普通高等教育“十三五”规划教材

Polyflow软件基础及其在双螺杆挤出仿真过程中的应用

Polyflow Ruanjian jichu Jiqi zai Shuangluogan jichu Fangzhen Guochengzhong de Yingyong

毕超◎编著





机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

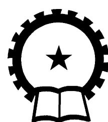
VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

普通高等教育“十三五”规划教材

Polyflow 软件基础及其在双螺杆挤出仿真过程中的应用

毕　超　编著



机　械　工　业　出　版　社

本书以双螺杆挤出为例，对 Polyflow 软件的基本操作方法进行了全面的介绍。全书共 8 章：第 1 章介绍了作者使用该软件进行模拟仿真的心得体会；第 2 章对使用 Gambit 软件划分网格的前处理过程进行了讲解，让读者充分体会网格规划在划分网格环节的重要性；第 3 章是使用 Polyflow 软件进行流场分析的基础部分，不仅包括流场设定的具体过程和使用后处理软件 Field-View 观察流场结果的具体方法，而且还对流场设定文件的修改、网格重叠技术的原理以及系列化流场计算问题的设定参数管理进行了讲解；第 4 章在第 3 章获得流场结果的基础上，基于示踪粒子轨迹跟踪技术实现了对混合过程的统计评价，并着重介绍使用 Polystat 统计模块进行统计分析的具体方法；第 5 章介绍非等温仿真问题的设定方法，并对比了两种非等温问题的出口和入口温度边界的计算结果；第 6 章讲述了适应性网格技术在双螺杆挤出仿真中的应用，以及由 CSV 文件转换获得 Polyflow 类型文件的操作过程；第 7 章讲述了螺杆受力状态的计算方法和相关场量的观察方法；第 8 章讲述了滑移条件和周期性边界条件的具体应用方法。

本书在编写过程中，为了便于读者学习，加入了大量的设定过程截图，还将计算结果的分析方法引入每一章，便于读者形成流场计算结果的分析思路。

本书使用的软件包括 Gambit（版本号 2.4）、Polyflow（版本号 15.0）以及 Fieldview（版本号 10）。这些软件目前有多个可用版本，各版本之间差异不大。如读者在使用非本书介绍的版本时发现较大差异，以致影响阅读，欢迎与编者交流。

本书内容全面丰富，难度由浅入深，适合于广大高分子材料加工相关专业的大专、本科、研究生及科研工作者阅读。

图书在版编目（CIP）数据

Polyflow 软件基础及其在双螺杆挤出仿真过程中的应用/毕超编著．—北京：机械工业出版社，2018.7

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-59660-8

Ⅰ.①P…　Ⅱ.①毕…　Ⅲ.①计算流体力学—应用软件—高等学校—教材

Ⅳ.①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 073235 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）

策划编辑：姜　凤　责任编辑：姜　凤　陈瑞文　张金奎

责任校对：樊钟英　封面设计：马精明

责任印制：张　博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13.75 印张 · 334 千字

0001—2500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-59660 -8

定价：49.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务　　网络服务

服务咨询热线：010-88379833　　机 工 官 网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-88379649　　机 工 官 博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版　　金 书 网：www.golden-book.com

前　言

聚合物加工过程数值仿真是提高相关行业设备开发和工艺改进效率的有效途径。本书中，笔者以从 2003 年开始学习和使用 Polyflow 软件的心得体会着手，结合十余年的教学经验，以双螺杆挤出为背景，对 Polyflow 及其配套软件（Gambit、FieldView、Polyfuse 和 Polystat 等）的使用方法进行了讲解。从内容上看，本书内容全面丰富，涵盖了 Polyflow 模拟中大部分的核心内容，如稳态和瞬态问题、等温和非等温问题、流动仿真和混合过程统计等。此外，还包括流场计算中的网格重叠技术、适应性网格技术、运动部件受力状态以及周期性边界条件和滑移边界条件的使用方法。

在本书的学习过程中，希望读者能够从头开始，特别是第 2 ~4 章的内容，要按顺序学习。在掌握 Polyflow 软件的基础知识后，学习第 5 ~8 章的内容就会比较简单。读者最好一边看书，一边操作软件，并体会每一个设定环节在整个仿真设定中的具体作用，这样才能熟练掌握使用 Polyflow 软件进行仿真的方法。对于有相关模拟经验的读者，建议先阅读本书的第 1 章，体会笔者学习和使用该软件的心得。对于基础相对薄弱的读者，建议在学习本书内容后，在开始自己的模拟研究工作前，阅读本书的第 1 章。

在开始 Polyflow 仿真之旅前，笔者希望读者能够记住一句话：“最复杂、最全面的仿真模型往往不是最合适、最有效的”。

本书献给我女儿毕安亿、儿子毕家辉、妻子赵昕楠以及已在天国的父亲。

因个人水平有限，在编写过程中难免会有疏忽和错误之处，恳请读者批评指正。欢迎广大读者与笔者联系，电子邮件是 bichao812@ sohu. com、bichao@ mail. buct. edu. cn。也可通过扫描本书每页上的二维码，将阅读时发现的问题以及需要与编者交流的问题上传，编者会及时回复。

编　者

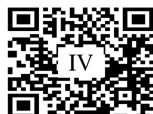


目　录

前　言

基　础　篇

第 1 章　Polyflow 软件介绍及软件使用心得 …… 2
1.1　Polyflow 软件的组成及其模块功能介绍 …… 2
1.2　建立仿真模型的基本流程 …… 3
1.2.1　几何建模及网格划分 …… 3
1.2.2　流场的设定 …… 3
1.2.3　后处理流场提取及统计分析 …… 3
1.3　Polyflow 软件使用心得体会 …… 3
1.3.1　双转子混合器端面形状的优化分析 …… 4
1.3.2　熔体齿轮泵稳压性能的分析 …… 5
1.3.3　往复式单螺杆销钉挤出机机筒销钉的搅拌作用分析 …… 7
第 2 章　双螺杆挤出模型的网格划分 …… 10
2.1　几何模型及仿真工程的建立 …… 10
2.1.1　几何模型 …… 10
2.1.2　仿真工程的建立 …… 11
2.2　螺纹元件部分的网格划分 …… 11
2.2.1　指定求解器 …… 13
2.2.2　几何模型的导入 …… 13
2.2.3　体网格划分 …… 13
2.2.4　边界和区域设定 …… 14
2.2.5　网格输出 …… 15
2.3　螺纹元件对应的流体区域部分的网格划分 …… 15
2.3.1　指定求解器 …… 16
2.3.2　几何模型导入 …… 16
2.3.3　体网格划分 …… 16
2.3.4　边界和区域设定 …… 25
2.3.5　网格文件导出 …… 25
2.4　啮合盘对应流体区域的网格划分 …… 26
2.4.1　指定求解器 …… 26
2.4.2　几何模型导入 …… 26
2.4.3　体网格划分 …… 27



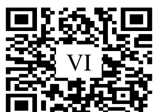
2.5　网格文件格式转换及组合 …… 34
2.5.1　格式转换 …… 34
2.5.2　网格组合 …… 35
思考题 …… 37
第3章　双螺杆等温瞬态流动问题的有限元求解 …… 38
3.1　流场仿真任务的创建 …… 38
3.2　流场计算任务的设定过程 …… 38
3.2.1　流场任务的创建及其类型的设定 …… 38
3.2.2　瞬态等温流场子任务的设定 …… 40
3.2.3　数值参数的设定 …… 48
3.2.4　后处理子任务的设定 …… 51
3.2.5　结果输出的设定 …… 52
3.2.6　流场输出管理 …… 53
3.2.7　文件管理 …… 54
3.2.8　程序运行 …… 54
3.3　使用FieldView软件观察流场结果 …… 57
3.3.1　结果文件的导入及显示窗口初始化 …… 57
3.3.2　流体区域边界上的剪切速率分布 …… 58
3.3.3　瞬态数据的动态显示 …… 62
3.3.4　截面上的速度向量分布 …… 63
3.3.5　挤出方向上的剪切速率变化曲线 …… 66
3.4　在瞬态任务的基础上完成稳态任务的设定 …… 68
3.5　网格重叠技术 …… 69
3.5.1　网格重叠技术简介 …… 69
3.5.2　推荐的插值关系 …… 70
3.5.3　运动部件复杂运动模式的检查 …… 70
3.5.4　注意事项 …… 70
3.6　系列化流场计算问题的设定参数管理 …… 72
3.6.1　构建模拟参数表格 …… 72
3.6.2　构建新建仿真任务的数据列表 …… 72
3.6.3　结果对比 …… 72
思考题 …… 74
第4章　双螺杆挤出混合性能的统计分析 …… 75
4.1　混合任务的设定 …… 75
4.1.1　仿真任务的创建 …… 75
4.1.2　计算区域的设定 …… 76
4.1.3　边界条件的设定 …… 77
4.1.4　流场的定义 …… 78
4.1.5　示踪粒子的生成 …… 79
4.1.6　粒子轨迹跟踪参数的设定 …… 80
4.1.7　存储属性的选择 …… 81
4.1.8　结果的存储 …… 82
4.1.9　运动部件的定义 …… 84



4.2 混合性能评价指标体系的建立 …… 86
4.2.1 启动 Polystat 统计模块 …… 86
4.2.2 数据读取 …… 86
4.2.3 示踪粒子运动轨迹的动态显示 …… 88
4.2.4 停留时间分布的统计 …… 92
4.2.5 分布混合特性的衡量——分布指数、分离尺度 …… 98
4.2.6 分散混合特性的衡量——最大剪切应力、少组分粒径变化 …… 112
思考题 …… 118

提 高 篇

第 5 章 双螺杆挤出非等温问题求解 …… 120
5.1 物性参数与边界条件 …… 120
5.1.1 几何模型 …… 120
5.1.2 网格划分 …… 120
5.1.3 边界条件 …… 121
5.1.4 物性参数 …… 122
5.2 非等温流场计算任务的设定 …… 122
5.2.1 创建仿真任务 …… 123
5.2.2 输出的设定 …… 149
5.2.3 流场结果管理 …… 151
5.2.4 文件管理 …… 152
5.2.5 任务运行 …… 152
5.3 对比方案的设定 …… 153
5.4 程序运行过程及结果对比 …… 156
5.4.1 程序运行过程 …… 156
5.4.2 结果对比 …… 157
第 6 章 适应性网格技术在双螺杆挤出仿真中的应用 …… 162
6.1 适应性网格技术 …… 162
6.1.1 inside 场 …… 163
6.1.2 细化方案 …… 163
6.1.3 相关参数 …… 163
6.2 使用适应性网格技术时 Polydata 的操作方法 …… 164
6.2.1 网格文件 …… 164
6.2.2 相关设定 …… 164
6.3 由 CSV 类型文件转换获得 Polyflow 类型文件 …… 168
6.3.1 转换数量的切换 …… 169
6.3.2 被转换文件的选择 …… 170
6.3.3 计算区域的选择 …… 170
6.3.4 网格细化次数的设定 …… 171
6.3.5 拓扑关系 …… 171
6.3.6 输出结果类型 …… 171
6.3.7 保存和退出 …… 172



6.3.8 转换结果…… 173
6.4 混合任务的设定…… 173
6.5 结果分析…… 173
第 7 章 挤出过程中螺杆的受力状态分析 …… 177
7.1 求解前的准备…… 177
7.1.1 运动部件的网格文件…… 177
7.1.2 运动部件的边界条件…… 177
7.1.3 强度理论和物性参数…… 177
7.2 运动部件弹性变形后处理子任务的设定…… 178
7.2.1 子任务计算区域的设定…… 179
7.2.2 物性参数和系统单位的设定…… 180
7.2.3 位移边界条件的设定…… 181
7.3 流场结果观察及结果分析…… 184
7.3.1 导入结果文件…… 184
7.3.2 背景及显示设定…… 184
7.3.3 螺杆元件应力云图显示…… 185
7.3.4 螺杆元件变形显示设定…… 190
第 8 章 滑移条件和周期性边界条件 …… 192
8.1 滑移条件的使用…… 192
8.1.1 滑移条件…… 192
8.1.2 基于运动部件的滑移问题设定…… 192
8.1.3 结果分析…… 197
8.2 周期性边界条件的使用…… 198
8.2.1 流场任务的设定…… 199
8.2.2 混合任务的设定…… 202
8.2.3 计算结果的对比…… 204





基　础　篇



第 1 章 Polyflow 软件介绍及软件使用心得

本章主要介绍 Polyflow 软件的组成及其模块功能，并对使用该软件的基本流程进行介绍，最后结合笔者的使用经验和几个典型的使用案例，讲述使用 Polyflow 软件进行流场求解时所要思考的两个问题。

1.1 Polyflow 软件的组成及其模块功能介绍

Polyflow 软件的基本框架如图 1-1 所示。

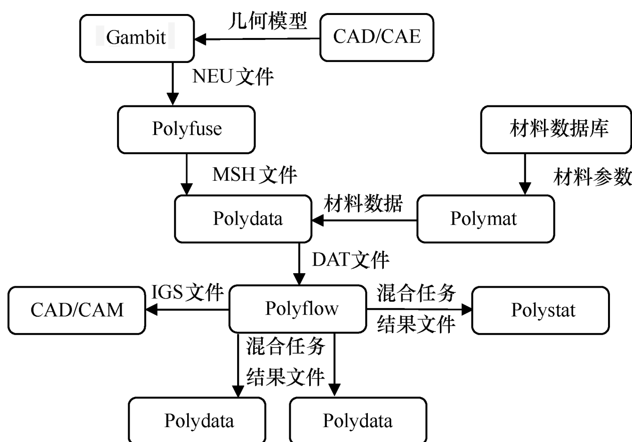


图 1-1 Polyflow 软件的基本框架

ANSYS Polyflow 是基于有限元算法的计算流体动力学软件，主要用于等温、非等温、二维或三维、稳态或瞬态黏性和黏弹性流体流动的仿真。该软件中的主要模块及功能介绍见表 1-1。

表 1-1 ANSYS Polyflow 的主要模块及功能介绍

模块名称	功能介绍
Polyflow	流场计算求解器，是软件的核心。调用 Polydata 模块设定生成的 dat 文件进行流场求解
Polydata	流场设定前处理模块。在该模块中可以完成物理模型、物性参数、边界条件、数值参数等环节的设定
FieldView	图形后处理软件，同类型软件还包括 CFD-Post、Flpost 等。利用该类软件可进行流场的可视化，提取流场分布结果



（续）

模块名称	功能介绍
Polydiag	监视流场计算的迭代收敛过程
Polyfuse	可以实现网格文件的组合，生成可用于各种计算问题的网格文件
Polystat	统计后处理模块。使用粒子轨迹跟踪技术获得示踪微元流动轨迹并记录沿着轨迹流场参数的变化后，利用统计方法来定量地分析流场的混合特性
Polymat	Polyflow 软件支持基于实验数据的仿真计算。将实验测得的物性数据（流变参数）数据输入 Polymat 模块。在 Polydata 中启动相关选项后，即可通过对实验数据的插值来构建物料的流变方程
Gambit	网格划分前处理模块。可以实现同样功能的软件还有 ANSYS ICEM CFD 和 Polymesh 等。这些前处理软件可以导入 . igs、. x_t、. sat 等多种格式的几何模型，并对其进行网格划分

1.2　建立仿真模型的基本流程

1.2.1　几何建模及网格划分

首先需要将几何模型导入前处理软件。以 Gambit 软件为例，可以导入 . igs、. x_t 等多种格式的三维模型，也可以导入 . sat 等多种格式的二维模型。在该软件中不仅可以进行边界层设定，而且可以通过对线网格的设定来控制面网格的布置和数量，甚至可进一步控制三维体网格划分模式。Gambit 软件针对 Polyflow 求解器的网格文件扩展名为 . neu，需要在 Polyman 模块中转换为 . msh 格式的文件。对于由多个几何体组成的计算模型，还需在 Polyfuse 模块中进行组合和相关操作。

1.2.2　流场的设定

将网格 . msh 格式的文件放入到仿真文件树内，双击 . msh 文件启动 Polydata 模块。这里可以设定物理模型（稳态问题、瞬态问题、演变问题、流场计算任务或混合任务，以及计算的维度）、物性参数、边界条件、网格重置（针对运动边界条件）、运动部件的运动、流场参数（包括流函数及压力特征点）、数值计算参数、输出结果类型和输出控制参数等。

1.2.3　后处理流场提取及统计分析

流场计算任务获得流场结果后，可以使用 FieldView 等后处理软件进行流场观察和结果提取。对于混合任务所得结果，可以使用 Polystat 模块进行统计后处理分析，以获得流场混合特性的定量评价指标。

1.3　Polyflow 软件使用心得体会

在进行模拟前，首先要明确研究目标。在充分分析研究对象的基础上，提出所要分析的性能，根据要分析的性能规划仿真任务的特征。这是相当重要的一步，只有充分了解需求，才能为满足需求建立仿真计划。以螺杆混合特征分析为例，如果要研究双螺杆转速对物料的



轴向混合效果的影响，那么就要建立三维等温模型，二维模型无法体现轴向流动。如果问题转换为黏性生热对出口胶料温度的影响，就需要选用非等温模型。同时，这一步中还要明确采用定性还是定量的方法对所研究的问题进行分析。对应上述问题，停留时间分布指标是描述轴向混合性能的重要指标。为了获取这样的结果，需要在瞬态流场结果的基础上进行混合任务计算，从而进行统计量化分析。其次，要建立仿真问题的物理模型。一方面需要对流场模型进行简化，去除对流场计算影响不重要的几何特征，另一方面需要明确流场模型中需要突出的几何细节。例如，在双螺杆啮合盘元件流场模拟中，可以忽略啮合盘轮廓的微小倒角，但是要突出相邻啮合块之间的轴向间隙。再次，要分析模型所需要施加的边界条件类型。对于等温问题要考虑流动边界条件，而非等温问题，除了流动边界条件外，还要考虑温度的边界条件。以非等温流动为例，如果出口边界存在与主流方向相反的流动，那么一般的outflow类型温度边界条件将无法真实地描述流场特征。这是因为，从该区域流出的流体温度是由系统计算获得的，但从出口截面流入的流体温度应该是来自其下游区域入口边界的反流温度。所以，选择给定流入计算区域的流体温度的出口条件，即流出流体区域的节点温度由系统计算获得，而从出口边界流入的温度由边界条件给定。本书将在后续章节中讨论这类边界条件的使用。最后，要判断采用的计算机是否有足够的计算能力完成计算。随着计算机技术的发展，计算机的内存和CPU均得到飞速提高。在计算能力能够保证的情况下，要思考如何用最经济的方式来获得能够满足需要的计算结果。

归根结底，在进行数值仿真之前要考虑以下两个问题：①想要通过数值模拟得到什么结果；②以什么样的计算模型能够最经济地得到所需结果。笔者结合多年使用软件的经验，通过几个典型的案例来讨论一下这两个问题。

1.3.1 双转子混合器端面形状的优化分析

双转子混合器在高分子材料混合加工过程中使用非常广泛，图1-2所示为其混炼段转子结构。首先我们来回答第一个问题，在仿真中想要研究转子截面形状对混合性能的影响。然后再看为了开展所期望的研究，需要建立什么样的计算模型，才能以最经济的方式得到所需的结果。

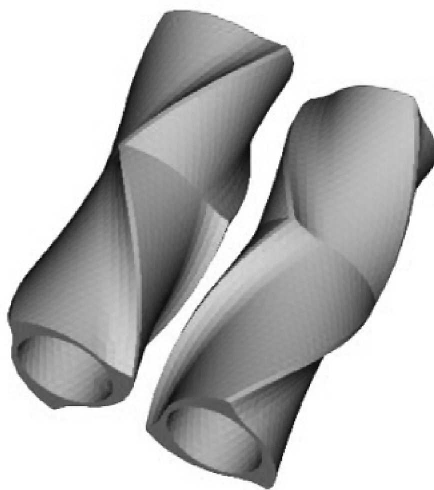
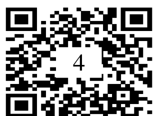


图1-2 双转子混合器转子模型

虽然三维流场模拟可以直观地分析三维流场特性，但是在这个模拟中我们更偏重采用二维模型，因为模拟要解决的问题是端面形状的影响，2D模型忽略了轴向的流动，这使得计算中轮廓的影响更加突出。与此同时，为了获得更清晰的转子轮廓构型，需要在模拟中引入适应性网格技术，以更清楚地描述轮廓形状对混合效果的影响。利用这一模型计算得到的流场结果如图1-3所示。这样的结果足以分析转子截面形状对混合性能的影响。



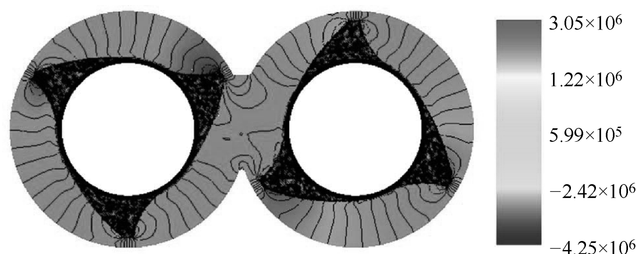


图 1-3　双转子混合器二维压力场模拟结果

1. 3. 2　熔体齿轮泵稳压性能的分析

熔体齿轮泵在挤出加工过程中起到稳定挤出的作用。模拟中要通过出口流量的实时变化来分析齿轮泵的稳压性能。这就回答了第一个问题。那么需要什么样的模型才能以最经济的方式获得所需的结果呢？下面考虑以下三方面问题：①能够描述瞬态流动状态下齿轮泵出口流量；②能够充分描述齿轮泵啮合区内物料的流场特征；③入口能够施加产量或压力波动条件。为了解决这三个问题，现进行如下考虑：使用网格重叠技术进行瞬态流场计算；使用适应性网格技术可以对啮合区沿转子轮廓进行网格细化；使用系统自带的余弦函数给定入口的流率或法向应力。除了常规流场设定外，还要考虑以下几个问题：

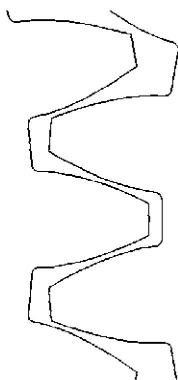


图 1-4　齿轮啮合模型
（包含轮齿间隙）

（1）齿轮修形

在齿轮泵工作时，标准齿轮啮合会形成一个封闭的空间，主要就是将原本连续的流体空间分割为多个独立空间，从而造成模拟无法正常进行。为此，在建模时，要考虑使用双驱动形式齿轮泵，假设两个轴独立驱动，且还需对齿廓进行修形，以保证两齿轮啮合齿两侧均有一定间隙，齿轮啮合模型如图 1-4 所示。

（2）流量平衡

对于一个具有入口和出口的流场模型来说，在保持质量守恒且流体不可压缩的情况下，入口流率与出口流率一致，这样也就无法分析齿轮泵是否能起到稳定挤出的作用。为此，在流场入口区域附近加设了一个回流口（见图 1-5）。这样流量平衡变为

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{bf} \tag{1-1}$$

式中，Q_{in}为入口流率；Q_{out}为出口流率；Q_{bf}为回流口流率。Q_{out}反映齿轮泵的输送能力的同时，还可以反映出口流率的波动状况。而入口过多的流量将从回流口流出，这与实际情况下，齿轮泵造成的压力反流是一样的。

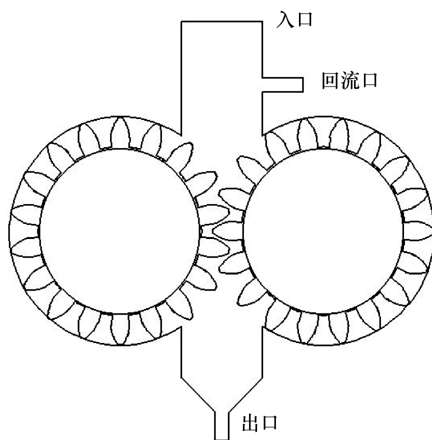


图 1-5　齿轮泵几何模型



（3）模型维度

采用三维模型还是二维模型呢？理论上说，三维模型能够获得更多流场细节特征，如齿轮端面与泵体侧壁之间间隙内的流动。但是，实际上三维模拟的计算是不容易实现的。这是因为间隙中的网格需要细化，势必会形成非常庞大的三维网格数量，消耗非常多的计算资源。即便使用适应性网格技术进行了多次网格细化，通常也无法获得清晰的运动部件表面轮廓，也就无法获得精确的计算结果。但是，使用二维模型时计算资源消耗大的问题可以得到解决，使用三次甚至更多次网格细化后，一般的计算机还足以完成计算。此时运动部件边界的清晰度足以满足齿轮泵稳压性能的计算精度要求，所以建议使用二维模型。

综上所述，计算中使用了图 1-5 所示的 2D 几何模型，解决了啮合间隙、流量平衡及轮廓边界网格细化的问题。图 1-6 给出了齿轮泵流场特征。图 1-7 给出了入口和出口流量曲线。由图 1-7 可以看出，当入口流量有较大波动时，出口流率可以保持稳定，即体现了齿轮泵的稳压能力。

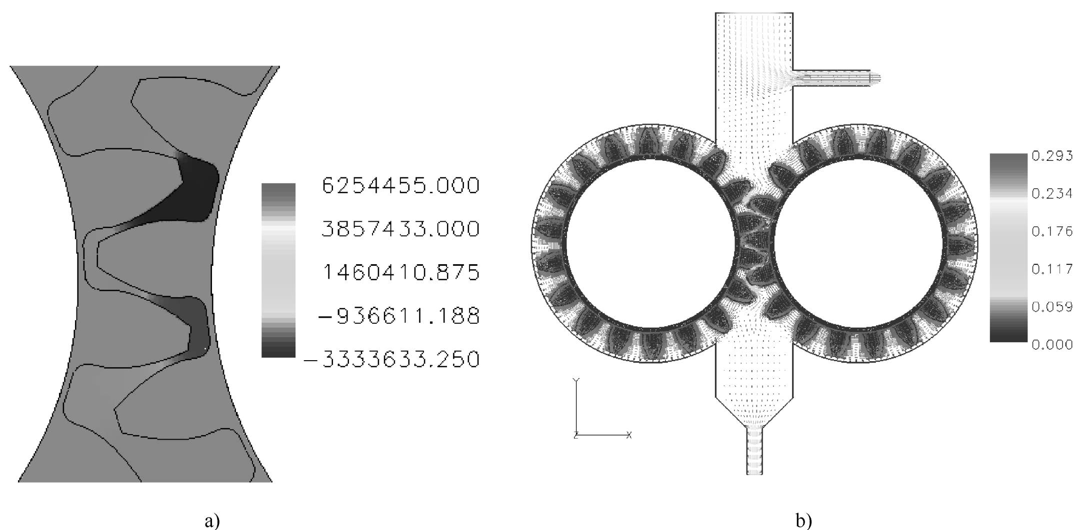


图 1-6　流场特征

a）压力场　b）速度场

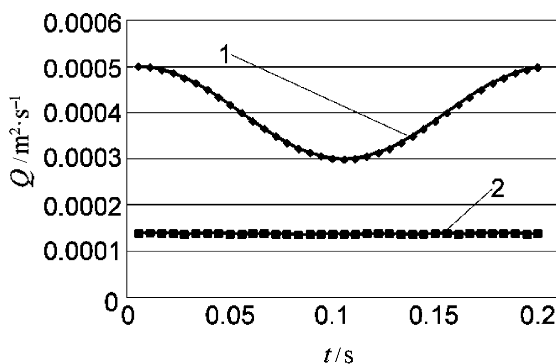


图 1-7　出入口流量曲线

1—入口流率　2—出口流率



1.3.3　往复式单螺杆销钉挤出机机筒销钉的搅拌作用分析

往复式单螺杆销钉挤出机螺杆旋转的同时有往复运动，螺杆运动规律复杂。混炼型螺杆元件的三维几何模型如图 1-8 所示，图中圆柱形几何体为机筒上安装的销钉。螺杆旋转和往复运动的过程中，销钉从螺棱通道中经过，起到搅拌作用。仿真时，要计算机筒上安装销钉的混炼作用。

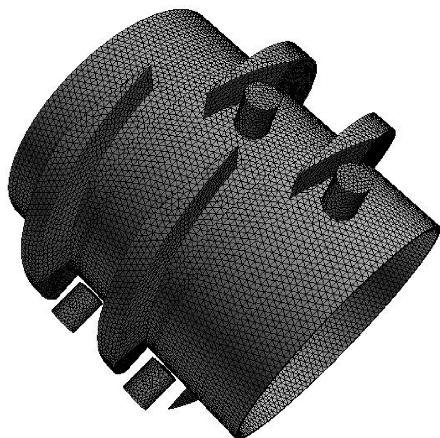


图 1-8　Buss 机混炼元件和销钉的三维模型

从设计角度来看，销钉的混炼作用通过三个途径发挥：①销钉与螺棱侧壁之间形成相对运动，起到剪切物料和清洁螺棱的作用；②销钉与螺杆根径形成相对运动，起到清理螺杆根部作用的同时也起到剪切作用；③销钉在流体流动区域起到搅拌物料流动的作用。理论上，三维模型能够充分描述以上三个方面的特性。但是，使用网格重叠技术后，销钉和螺杆均作为运动部件，其轮廓的清晰程度对流场结果影响至关重要，特别是在量化销钉所起的作用时。使用适应性网格技术是提高运动部件表面轮廓清晰度的有效途径。本例的初始网格如图 1-9 所示，其中包含了边界层网格，以获取机筒和螺杆之间间隙内物料的流动状态。其余位置网格尺寸均约为 2mm。在这个尺寸下，如果网格细化一次，则细化后的网格尺寸为 1mm；细化两次，网格尺寸为 0.5mm，细化三次为 0.25mm。但是，销钉和螺棱之间的间隙最小处在 0.3mm 左右，0.25mm 的网格细化程度无法清晰地描述间隙内的物料流动，因此需要更加细致的网格。但是从三维网格数量的角度来说，细化三次后的网格数量已经非常巨大，考虑后续的由 CSV 格式输出结果转换为 RES 类型结果时的时间消耗，以及混合任务中读取流场结果时的内存消耗，多于三次的网格细化是不合理的。为此，调整思路使用二维模型，将螺杆沿着外径展开，获得二维模型（见图 1-10）。

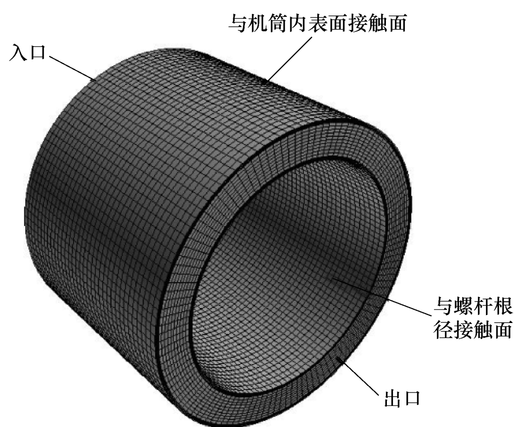


图 1-9　流体区域几何体网格模型



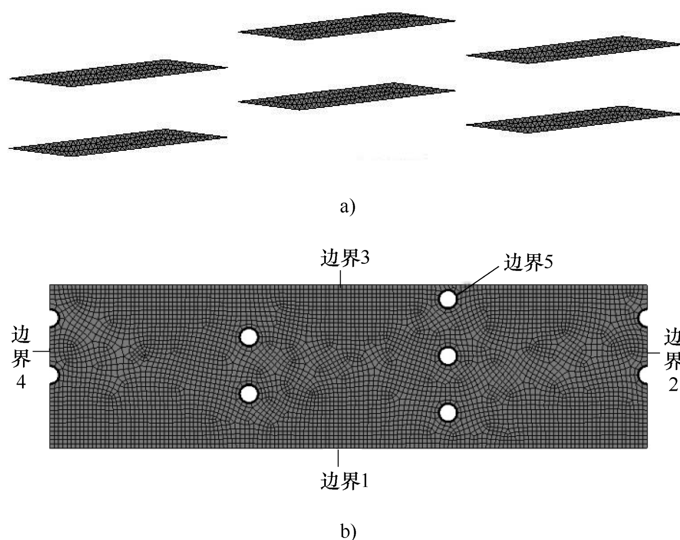


图 1-10　展开 2D 模型

a）螺杆元件　b）流体区域

这样就忽略了槽深厚度方向的影响，从而无法描述销钉发挥作用的第二个途径。此外，将螺杆考虑成运动部件，并且将流体区域与销钉重叠的部分去掉，以构成精确的销钉轮廓。这样不仅减少了运动部件的数量，同时由于具有明确的边界，因此可以使用边界层技术对销钉附近进行局部细化网格设计（见图 1-11）。值得注意的是，使用这个模型还有一个需要解决的问题：流体区域展开所形成的两个侧边的边界条件如何施加？这个边界需要施加合理的边界条件才能使该模型具有使用价值，特别是基于这个模型，后续还要计算示踪粒子轨迹，并进行混合效果的量化评价。对于这两个边界，使用周期性入口和出口条件，从模型表面上看，两边的边界是相互分开的，但是使用周期性入口和出口条件后，在进行混合任务计算时，可以想象这两个边界是连通的。并且只要有足够长的周期来构成完整的计算模型，将不会有示踪粒子从这两个边界离开流场，这样可以保证计算的正确性。图 1-12 给出了流场中局部位置的速度场分布。

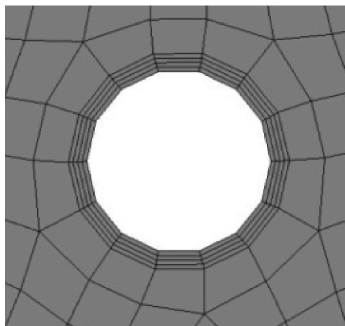


图 1-11　销钉附近的网格划分（边界层）

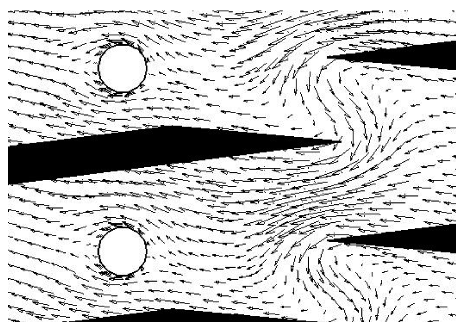


图 1-12　流场内的速度场分布



图 1-13 给出了销钉与螺棱之间间隙内的剪切应力分布。从结果可以看出，展开后所得的 2D 模型不仅能够精确描述复杂的速度分布状态，而且可以获得局部间隙内的剪切应力分布，这些都是 3D 模型无法获得的。可见，二维模型才是最经济的计算模型。

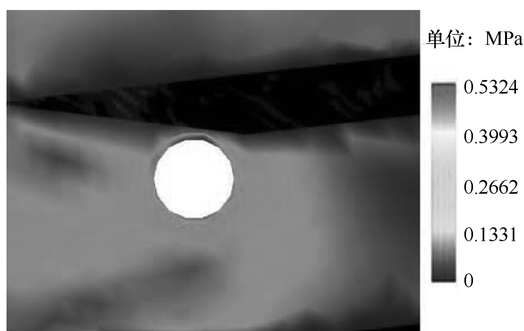


图 1-13　销钉附近的剪切应力分布



第 2 章 双螺杆挤出模型的网格划分

网格划分是有限元仿真计算的重要环节。网格质量的好坏，决定了计算是否能成功、结果是否正确。在双螺杆挤出模拟中，要在网格划分阶段合理规划间隙内的网格，才能正确描述间隙内的物料流动。本章主要讲述使用前处理软件 Gambit 对计算模型进行网格划分的基本方法，主要包括三个部分：螺纹元件的网格划分；螺纹元件对应的流体区域网格划分；啮合盘元件对应的流体区域网格划分。

2.1 几何模型及仿真工程的建立

2.1.1 几何模型

图 2-1 所示为一个典型的双螺杆挤出模型，其中包括两个螺杆元件模型和一个流体区域模型，模型具体参数见表 2-1。螺杆元件通常包括两类：螺纹元件和啮合盘元件。螺纹元件、啮合盘元件和流体区域的三维模型如图 2-2 所示。这些几何模型可通过扫描本页二维码下载，文件名为 screw. x_t、KD. x_t 和 fluid. x_t。双螺杆建模需要遵循螺杆几何学的基本原理。

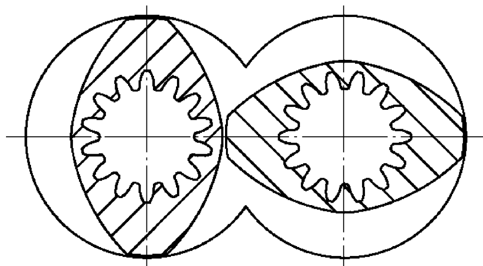
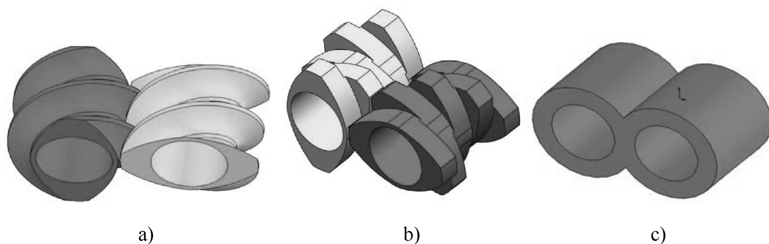


图 2-1 双螺杆挤出模型



a) b) c)

图 2-2 三维模型

a）螺纹元件 b）啮合盘元件 c）流体区域



表 2-1　双螺杆挤出模型的几何参数

螺杆外径	25mm
螺杆根径	16mm
机筒内径	26mm
中心距	21mm
导程	25mm
间隙	0. 5mm
啮合盘轴向间隙	0. 5mm
啮合盘错列角	45°

2. 1. 2　仿真工程的建立

在进行网格划分前，首先要建立双螺杆挤出过程数值模拟对应的工程文件。启动 Polyman 后，单击新建工程按钮，打开如图 2-3 所示的新建工程对话框，输入工程名称 TSE_simulaiton 后，指定存放目录⊖。单击新建 Gambit 网格文件按钮，分别建立名为 screw 和 fluid 的 Gambit 文件。此时，仿真文件树如图 2-4 所示。从文件树可以看出，在工程文件的目录内包括 Geometry 和 Simulation 两个目录，且在 Geometry 目录内包括 Gambit 和 Mesh repository 两个目录。其中，Gambit 目录中还包括刚才建立的名为 screw 和 fluid 的两个 Gambit 文件目录。将 screw. x_t 和 fluid. x_t 文件复制到对应文件夹。

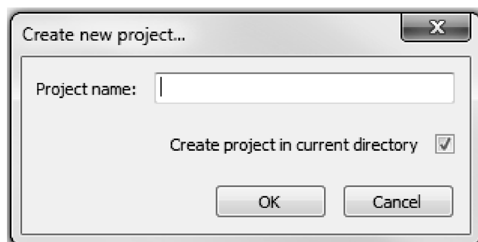


图 2-3　新建工程对话框

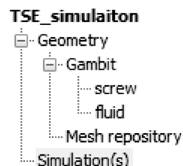


图 2-4　新建 Gambit 文件后的文件树

2. 2　螺纹元件部分的网格划分

螺纹元件是双螺杆挤出机中主要起输送作用的元件。本节讲述使用 Gambit 软件对其进行网格划分的过程。

复制 screw. x_t 文件所在目录的地址，并粘贴在 Gambit 启动窗口的工作目录（Working Directory）下拉列表框内（见图 2-5）。单击运行（Run）按钮启动 Gambit 程序，Gambit 的工作窗口如图 2-6 所示。

⊖ 要养成从计算工程文件建立 Gambit 文件的习惯，便于文件管理。此外，还要养成建立软件使用工作目录的习惯，将仿真工程文件放在非系统硬盘内，且保证硬盘有足够的存储空间。



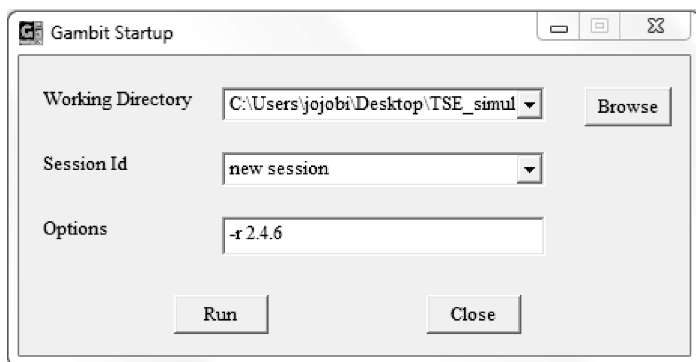


图 2-5　Gambit 启动窗口

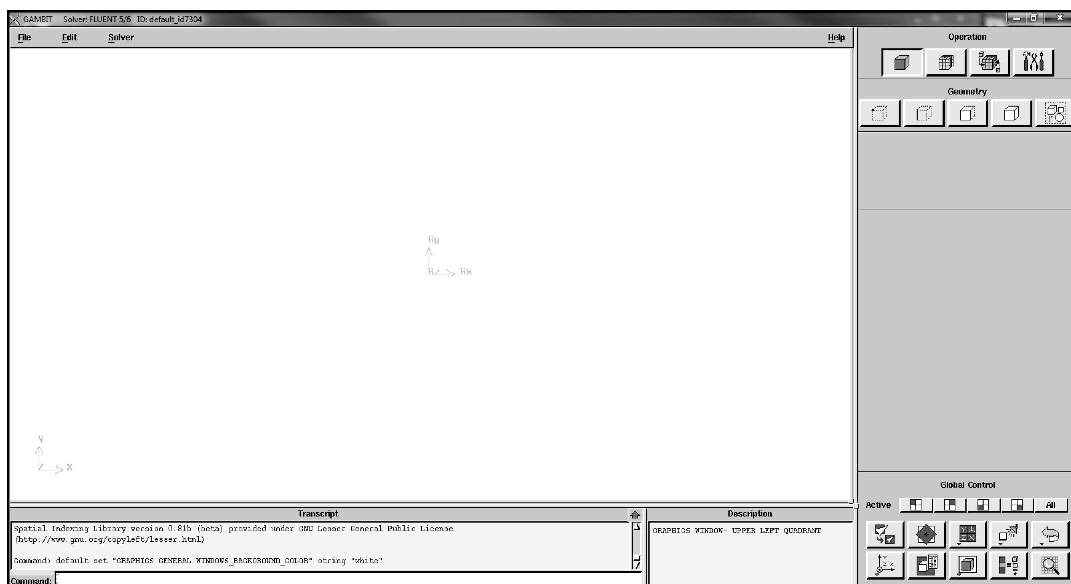


图 2-6　Gambit 工作窗口

Gambit 窗口的右上角为 Gambit 操作面板，如图 2-7 所示，其上四个按钮分别为几何操作按钮、网格划分按钮、区域设定按钮和工具选项按钮。分别单击这四个按钮会出现对应的操作面板，包括几何操作面板、网格操作面板、区域操作面板和工具操作面板，如图 2-8 ~ 图 2-11 所示。

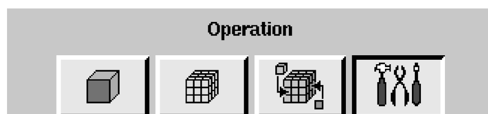


图 2-7　Gambit 操作面板

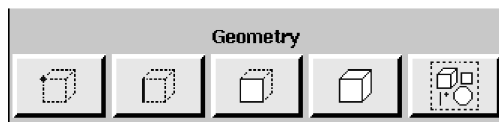


图 2-8　几何操作面板

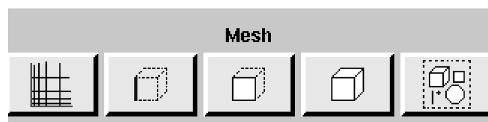


图 2-9　网格操作面板



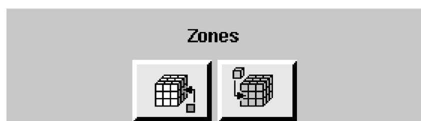


图 2-10　区域操作面板

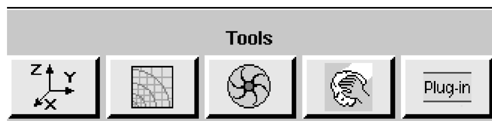


图 2-11　工具操作面板

2.2.1　指定求解器

单击图 2-6 中 Gambit 菜单栏上的 Solver 按钮，在其下拉菜单中选择 Polyflow 求解器。设定后，在进行网格结果输出时，将输出适用于 Polyflow 求解的 NEU 类型文件。

2.2.2　几何模型的导入

单击图 2-6 中 Gambit 菜单栏上的 File 按钮，在其下拉菜单内选择 Import 选项，然后从中选择 Parasolid 选项。在打开的 Parasolid 类型文件导入对话框中（见图 2-12），单击 Browse 按钮，在打开的文件浏览器中选择 screw. x_t 文件后，连续两次点击 Accept 按钮，将文件导入。

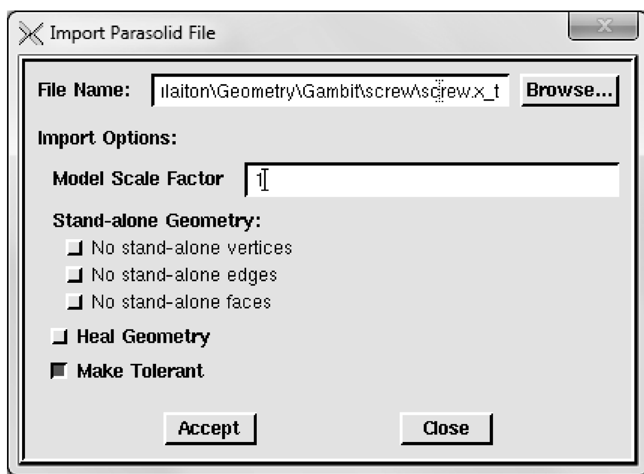
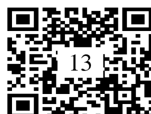


图 2-12　Parasolid 类型文件导入对话框

2.2.3　体网格划分

由于螺杆元件的几何形状相对复杂，因此这里使用四面体网格对其直接进行体网格划分。单击 Gambit 操作面板（见图 2-7）上的网格划分按钮，开启网格操作面板（见图 2-9）。单击其中的体网格操作按钮，打开如图 2-13 所示的体网格绘制对话框。单击 Volumes 栏中的文本框，使其处于选中状态。按住〈Shift〉键的同时，在 Gambit 图形窗口单击螺纹元件的轮廓，以选中螺纹元件对应的几何体[⊖]。同时在 Elements 栏中选定 Tet/Hybrid 选项，在 Type

⊖ Gambit 图形窗口操作中的鼠标使用。按〈Shift + 鼠标左键〉为选取功能；按〈Shift + 鼠标右键〉为确认功能；按〈Shift 键 + 鼠标中键〉为调整选择对象功能。



栏中选择 TGrid 选项。这两个选项选择后系统会使用非规则型四面体网格对指定的几何体进行网格离散。在 Spacing 栏中选择 Interval size 方式，在文本框中输入 1.3（单位为 mm），以 1.3mm 边长单元对指定的几何体进行网格离散[1]。保持其他选项为图 2-13 中的默认状态，单击应用(Apply)按钮，进行体网格划分。划分结果显示划分的单元数为 11739。网格结果如图 2-14 所示。

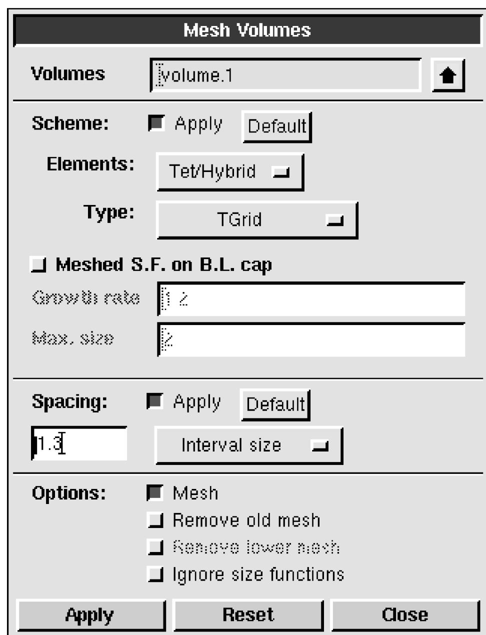


图 2-13　体网格绘制对话框（设定后的状态）

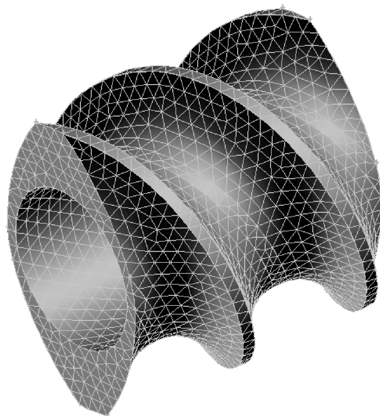


图 2-14　螺纹元件网格图

2.2.4　边界和区域设定

为了确保本节设计的螺纹元件网格能够在运动部件受力状态一章（本书的第 7 章）中使用，需要将螺杆元件的边界划分为四组[2]。第一组和第二组分别为螺杆元件的端面，第三组为螺杆元件与流体物料接触的面，第四组为螺杆内孔圆柱面。单击 Gambit 操作面板（见图 2-7）上的区域设定按钮 。在区域操作面板（见图 2-10）上单击左侧的边界设定按钮 后，打开如图 2-15 所示的边界设定对话框。在 Action 栏中选定 Add 选项，单击 Entity 栏中的向上箭头按钮，在出现的边界列表窗口左侧的待选区中选择上端面对应的 face.1 面后，单击 ---> 按钮将其放入右侧的选定列表，单击 Close 按钮关闭边界列表窗口。可以在 Name 文本框中对边界名称进行修改[3]。同时保持边界类型为 ELEMENT_SIDE。单击 Apply 按钮后，在图 2-15 的生成边界列表中会出现名为 element_side.1 的第一组边界。同样过程，

[1] Spacing 栏有三种算法控制单元的边长，其中一个是 Interval size 算法，直接设定单元边长。第二个是 Interval count 算法，可以设定边界上的分段数。第三个是 shortest edge，可以设定最短的边长。

[2] 如不考虑运动部件的受力问题，可将所有边界合并到一起，生成一个边界。

[3] 边界名称包括名称和序号两部分，中间以“.”隔开。在边界重新命名时，边界名称部分可以任意命名，但是其后的序号一定要按照顺序编号。否则，生成的网格文件在进行 NEU 类型到 MSH 类型的转换时将会出现错误。



选择下端面对应 face. 11 作为第二组边界；选择 face. 2 ~ face. 10 后，删除 face. 8，作为第三组面；选择 face. 8 作为第四组面。

单击区域操作面板（见图 2-10）上的区域设定按钮，打开如图 2-16 所示的 Specify Continuum Types 区域定义窗口。在 Action 栏中，当 Add 选项处于选定状态时，将 Type 栏中的 FLUID 类型转换为 SOLID 类型。保持 Entity 栏中默认的 Volumes 选项，单击其右侧的文本框使其处于选中状态，随后单击右侧的向上箭头按钮，在出现的 Volumes 选择列表中，选中左侧的 Volume. 1 几何体，然后单击 ---> 按钮，将其放入右侧的选中几何体列表中。返回如图 2-16 所示的区域定义窗口，将 Name 文本框中区域名称对应的编号修改为 1。单击 Apply 按钮则生成名为 solid. 1、类型为 SOLID 的区域。

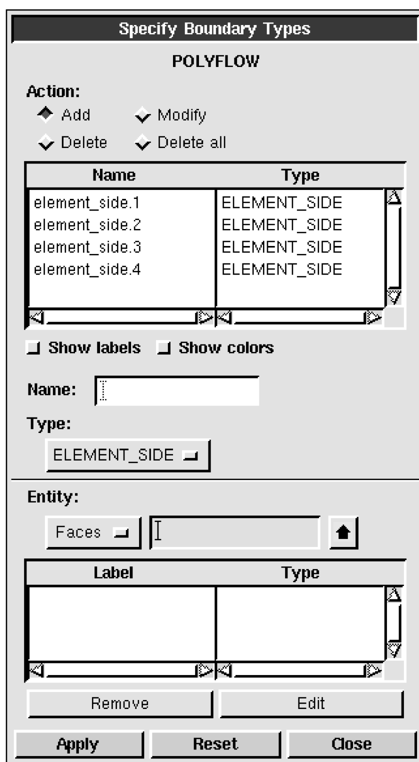


图 2-15　边界设定对话框（设定后的状态）

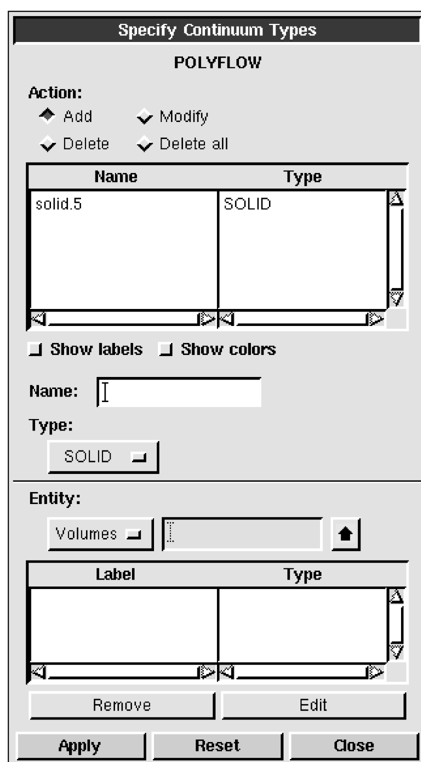


图 2-16　区域定义窗口

2.2.5　网格输出

单击图 2-6 中 Gambit 菜单栏上的 File 按钮后，在其下拉菜单中选择 Export 选项，并选择 MESH 类型文件，这样将输出 NEU 类型的文件，命名为 screw. neu，然后保存并退出 Gambit 文件。

2.3　螺纹元件对应的流体区域部分的网格划分

复制 fluid 所在目录的地址，并粘贴在 Gambit 启动窗口（见图 2-5）的工作目录（Work-



ing Directory）下拉列表框内。单击 Run 按钮启动 Gambit 程序。

2.3.1　指定求解器

单击图 2-6 中 Gambit 菜单栏上的 Solver 按钮，在其下拉菜单中选择 Polyflow 求解器。设定后，在进行网格结果输出时，将输出适用于 Polyflow 求解的 NEU 类型文件。

2.3.2　几何模型导入

单击图 2-6 中 Gambit 菜单栏上的 File 按钮，在其下拉菜单内选择 Import 选项，然后从中选择 Parasolid 选项。在出现的 Parasolid 类型文件导入对话框（见图 2-12）中，单击 Browse 按钮，选择 fluid. x_t 文件后，连续两次点击 Accept 按钮，将文件导入。

2.3.3　体网格划分

使用六面体规则性网格对流体区域进行网格划分。

1. 流体区域的分区

图 2-2 所示的流体区域几何模型形状相对复杂，不能直接使用规则性网格算法进行六面体网格划分，所以要对流体区域进行分区。

（1）生成特征点

在 Gambit 操作面板（见图 2-7）上单击几何操作按钮，在几何操作面板（见图 2-8）上单击特征点操作按钮，打开如图 2-17 所示的点操作面板，单击其中的创建点按钮，打开如图 2-18 所示的创建点对话框，在默认的坐标系下分别输入（10.5,0,0）和（−10.5,0,0）两组坐标，生成如图 2-19 所示的两个圆孔中心点。

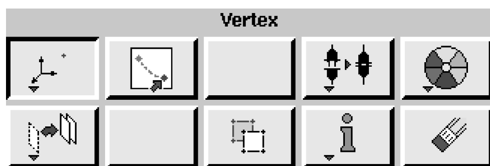


图 2-17　点操作面板

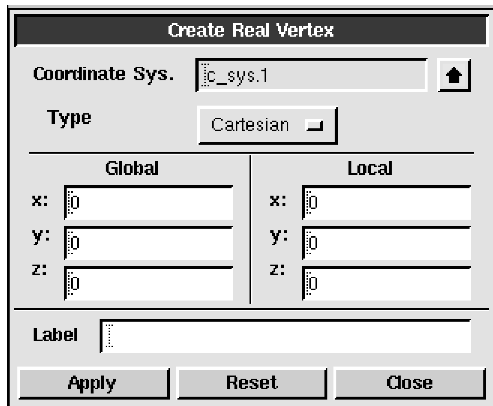


图 2-18　创建点对话框

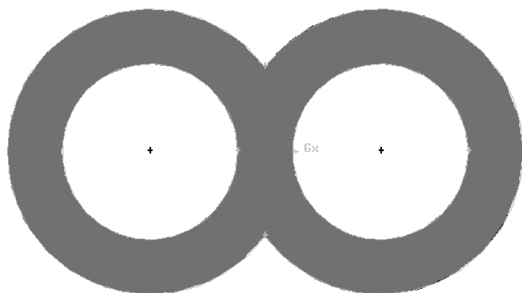
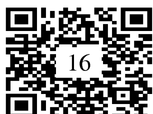


图 2-19　两圆心特征点

（2）连接线

单击几何操作面板（见图 2-8）上的边操作按钮，打开如图 2-20 所示的边操作面板。单击其中的线生成按钮，打开如图 2-21 所示的创建直线边对话框。按住〈Shift〉键，并在



Gambit 图形窗口中使用鼠标左键按照图 2-22 中标注的顺序依次选择 1、2、3 和 4 点，保持按住〈Shift〉键的同时，单击鼠标右键进行选择确认，完成 1 ~ 4 点的连线。同样操作选择 4 点和 1 点，进行连线。完成连线后的结果如图 2-23 所示。

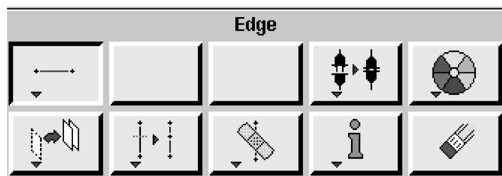


图 2-20　边操作面板

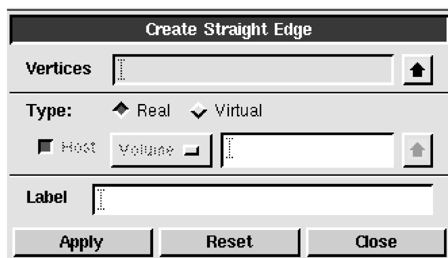


图 2-21　创建直线边对话框

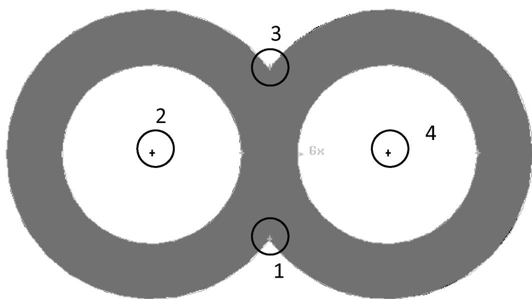


图 2-22　选取点

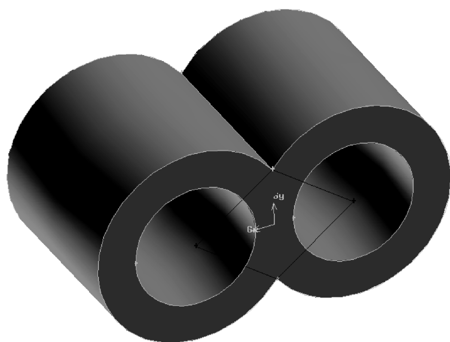


图 2-23　连线结果

（3）由线生成面

单击几何操作面板（见图 2-8）上的面操作按钮，打开如图 2-24 所示的面操作面板。单击其上的由封闭边线生成面按钮，打开如图 2-25所示的由封闭边线创建面对话框。按住〈Shift〉键，并在 Gambit 图形窗口中使用鼠标左键选择上一步生成的四条边线。保持按住〈Shift〉键的同时，单击鼠标右键进行选择确认，生成如图 2-26 所示的菱形面。

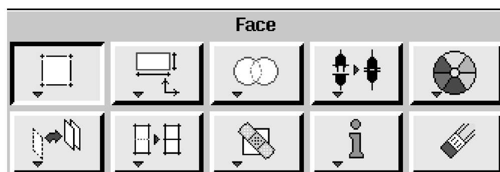


图2-24　面操作面板

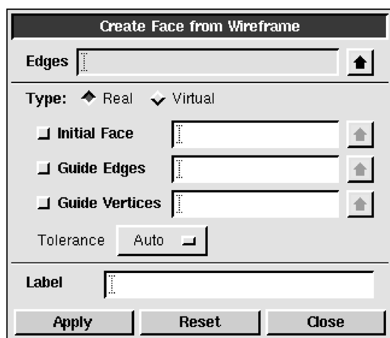


图 2-25　由封闭边线创建面对话框

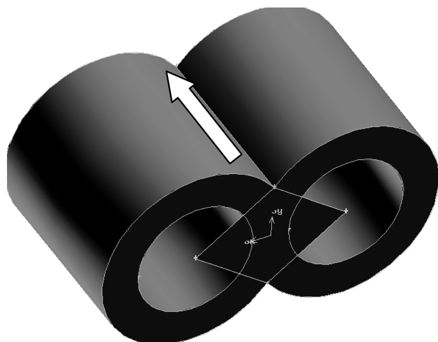
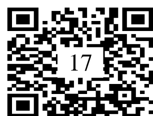


图 2-26　生成面结果



（4）采用 Sweep 扫描算法生成体

单击几何操作面板（见图 2-8）上的体操作按钮 ，打开如图 2-27 所示的体操作面板。右键单击左上第一个按钮 ，在弹出的快捷菜单中单击 Sweep 算法生成体按钮 ，打开如图 2-28 所示的面扫描对话框。Faces 栏为选中状态的情况下，按住〈Shift〉键，并在 Gambit 图形窗口中单击选择上一步生成的面。当 Edge 栏为选中状态时，按住〈Shift〉键，并在 Gambit 图形窗口中使用鼠标左键选择图 2-26 中箭头所标记的两外圆面的交线为扫描轨迹线。通过按〈Shift + 鼠标中键〉的方式，调整轨迹线的方向为箭头方向。单击 Apply 按钮进行确认，生成如图 2-29 所示的体。

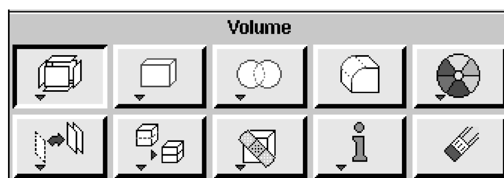


图 2-27　体操作面板

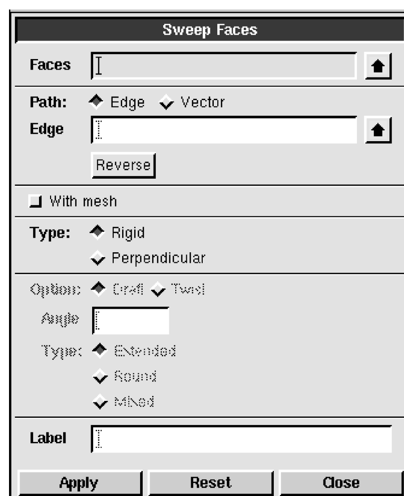


图 2-28　面扫描对话框

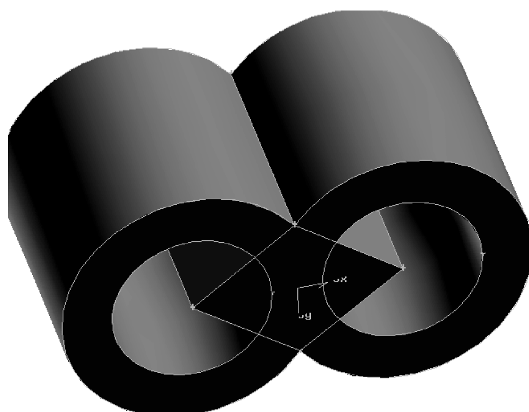


图 2-29　扫描算法生成的体

（5）区域的分区

使用上一步获得的几何体对流体区域几何体进行分区。单击体操作面板（见图 2-27）上第二行左数第二个区域分割按钮 ，打开如图 2-30 所示的体分割对话框。当 Volume 栏中文本框为选择状态时，按住〈Shift〉键，并在 Gambit 图形窗口中单击鼠标左键选择流体区域几何体；当第二个 Volumes 栏为选中状态时，按住〈Shift〉键，并在 Gambit 图形窗口中使用鼠标左键选择上一步生成的几何体；Split With 选项为默认的 Volumes（Real）体选项，表明使用上一步生成的几何体对流体区域的几何体进行分割。单击 Apply 按钮后完成分割操作。分割后的几何模型由五部分组成，其中原来的流体区域被分割为三个子区域，另外



还有两个原属于上一步生成的几何体的子区域，如图 2-31 所示。

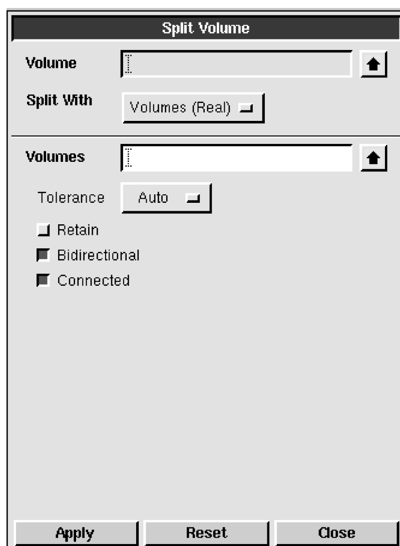


图 2-30　体分割对话框

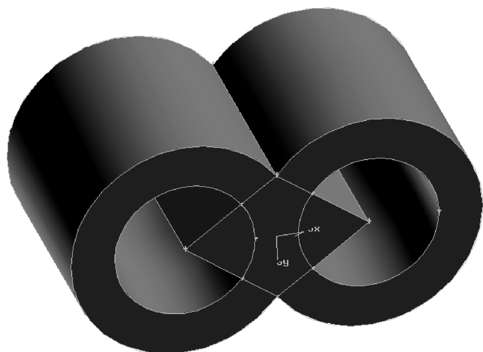


图 2-31　分割后的几何体

（6）删除多余子区域

单击体操作面板（见图 2-27）上第二行右数第一个删除几何体按钮，打开如图 2-32 所示的几何体删除对话框。在 Volumes 栏中文本框为选中状态的情况下，按住〈Shift〉键，并在 Gambit 图形窗口中使用鼠标左键选择多余的两个几何体。单击 Apply 按钮后，多余几何体被删除，得到分区后的流体区域几何模型，如图 2-33 所示。

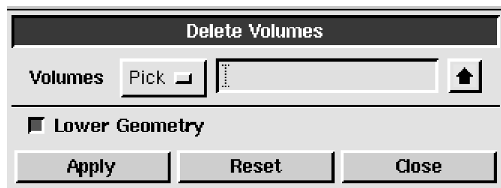


图 2-32　几何体删除对话框

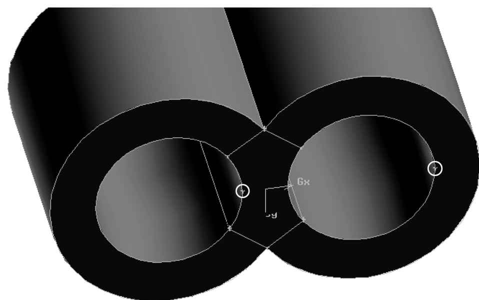


图 2-33　分区后的流体区域几何模型

（7）多余特征的消除

在图 2-33 中圈出位置出现了两个多余的特征点，如果保留会给后续的网格划分带来问题，这里使用边操作面板（见图 2-20）中的边线合并工具。在边操作面板中的边线拆分按钮上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中单击边线合并按钮。单击该按钮后打开如图 2-34 所示的边线合并对话框。当 Edges 栏中文本框为选定状态时，按住〈Shift〉键，并在 Gambit 图形窗口中使用鼠标左键选择特征点两侧的边线，然后按住〈Shift〉键并单击鼠标右键进行确认，完成边线合并。这样的特征点共有四个。处理后得到如图 2-35 所示的几



何模型，用于后续的网格划分。

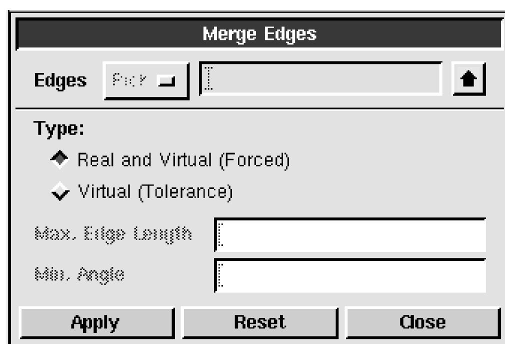


图 2-34　边线合并对话框

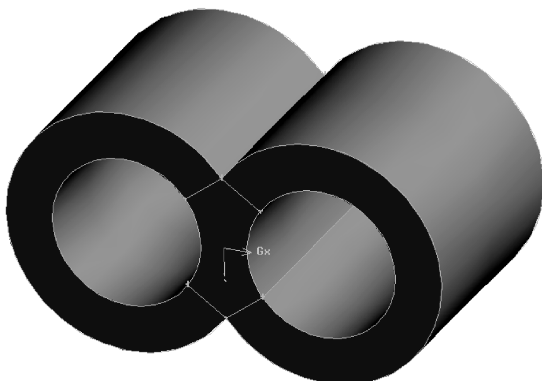


图 2-35　多余特征点处理后的几何模型

2. 边界层的划分

双螺杆挤出过程中机筒与螺杆之间的间隙以及两螺杆之前的啮合间隙对物料的剪切有很大作用。为了描述间隙内的物料流动，需要对间隙局部进行合理的网格规划。Gambit提供了边界层网格划分工具，可有效地在间隙局部网格细化中使用。单击 Gambit 操作面板（见图 2-7）上的网格划分按钮，打开网格操作面板（见图 2-9），单击边界层按钮，打开如图 2-36 所示的边界层控制面板。单击边界层设定按钮，打开如图 2-37 所示的边界层设定窗口。在 Definition 栏中设定相关参数，在保持 Uniform 均匀算法的基础上，第一行宽度 First row（a）设定为 0. 125mm，宽度增长因子 Growth factor（b/a）设定为 1（表示各行等距），行数 Rows 设定为 4，边界层总宽度 Depth（D）可计算出来，等于 0. 5mm⊖。这正好与机筒和螺杆之间间隙以及螺杆啮合间隙一致。在确保 Attachment 栏的边界 Edges 文本框处于选定状态时，按住〈Shift〉键，在 Gambit 图形窗口中单击选取如图 2-38 所示的端面上的 1 ~ 6 号边，以及对面端面上的相应的六条边。生成边界层结果，如图 2-38 所示。选择过程中，如边界层方向与两端面不平行时，需按住〈Shift〉键并按鼠标中键以调整边界层的方向。

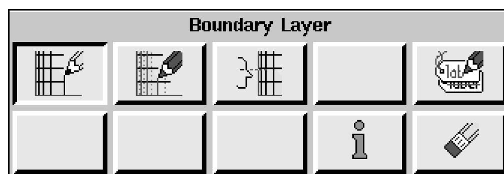
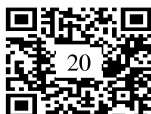


图 2-36　边界层控制面板

⊖ 边界层设计中几个参数之间的关系为

$$D = a + a\left(1+\frac{b}{a}\right) + a\left(1+\frac{b}{a}\right)^2 + \cdots + a\left(1+\frac{b}{a}\right)^{R-1}$$



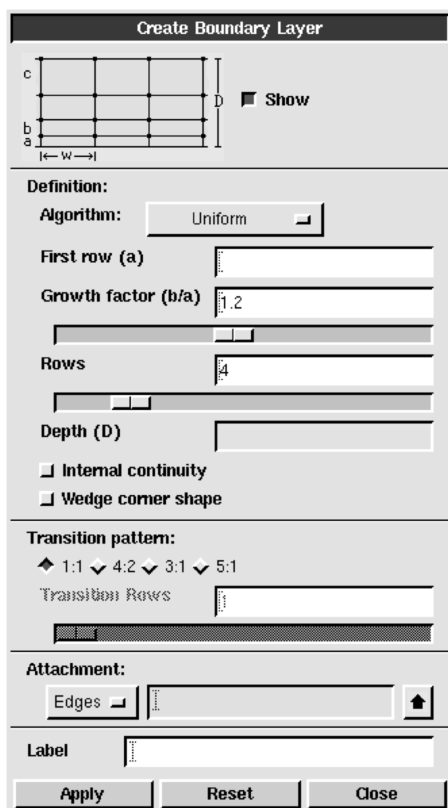


图 2-37　边界层设定窗口

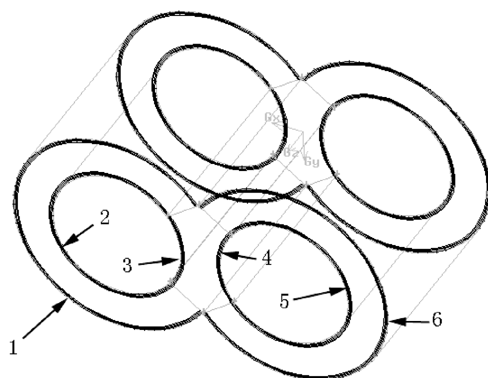


图 2-38　边界层指定边及划分结果

为了便于后续步骤的进行，这里将边界层进行隐藏处理。单击整体控制面板（见图 2-39）中的模型显示属性按钮，在打开的如图 2-40 所示的指定显示属性窗口中，单击 B. Layers 选项，并单击其对应的向上箭头按钮，在出现的如图 2-41 所示的边界层列表窗口中单击All->按钮，将刚才生成的边界层都选中并放入到已选择列表框中。单击 Close 按钮，返回指定显示属性窗口。选中 Visible 选项，并将其对应的 On/Off 状态选定为 Off 状态。单击 Apply 按钮，图形窗口中几何体上的边界层即被隐藏。

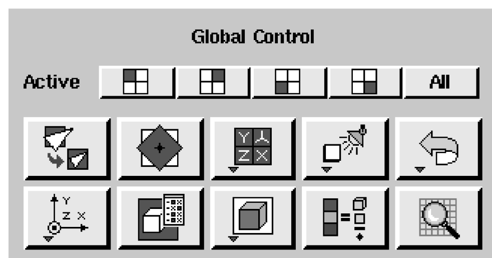


图 2-39　整体控制面板



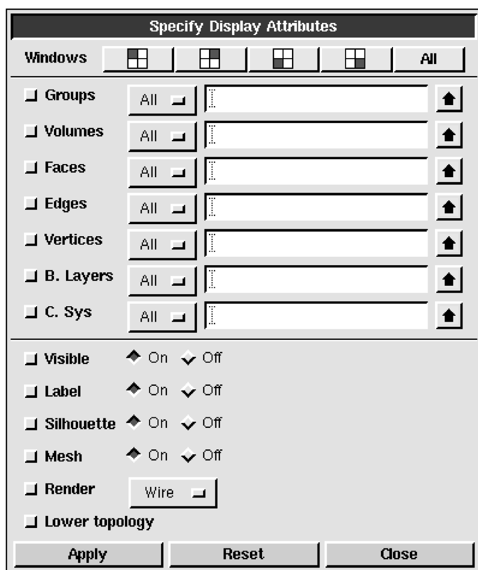


图 2-40　指定显示属性窗口

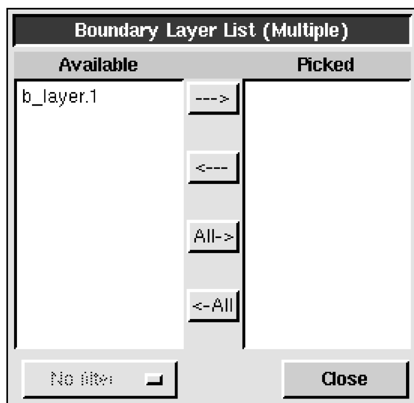


图 2-41　边界层列表窗口

3. 线网格的规划

（1）圆周方向线网格划分

在瞬态任务模拟中，螺杆旋转一圈计算 N 个结果（本例中螺杆转动一周取 60 个结果）。使用网格重叠技术时，希望螺杆元件每转动一个角度都能经过至少一个有效单元，所以要对圆周方向边线进行网格规划。从内孔来看，圆周边线由两部分组成，即 C 型边界和啮合区圆周边线。圆周方向全部网格数规划为 N 的整数倍。根据 C 型边界和啮合区圆周边线长度之比，确定两段边线上的网格数。本例中圆周网格数设定为 120，且 C 型边界和啮合区圆周边线长度之比大约为 5∶1，所以两段线的网格数量为 100 和 20。

单击网格操作面板（见图 2-9）上的边网格操作按钮，然后在出现的边网格操作面板（见图 2-42）上单击边线网格划分按钮，打开如图 2-43 所示的边网格划分对话框。在 Edges 栏文本框处于被选中状态的情况下，按住〈Shift〉键，在 Gambit 图形窗口中使用鼠标左键选取如图 2-44 所示的 C 型边线。在 Spacing 栏的 Interval size 按钮上单击鼠标右键，将间隔控制算法由指定分段长度算法（Interval size）转换为指定分区数算法（Interval count），间隔数量设定为 100。单击 Apply 按钮完成 C 型边线的网格划分，如图 2-44 所示。使用同样的方法对啮合区圆周边线进行网格划分，间隔数量设定为 20，划分结果如图 2-45 所示。

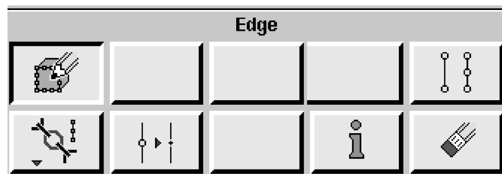


图 2-42　边网格操作面板



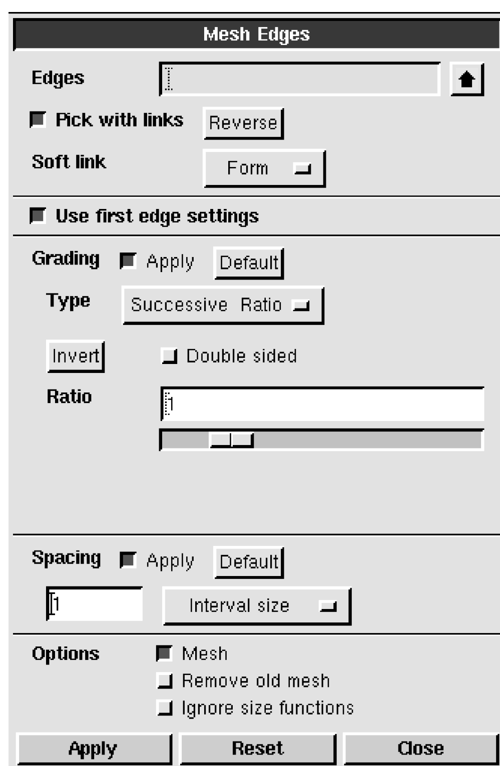


图 2-43　边网格划分对话框

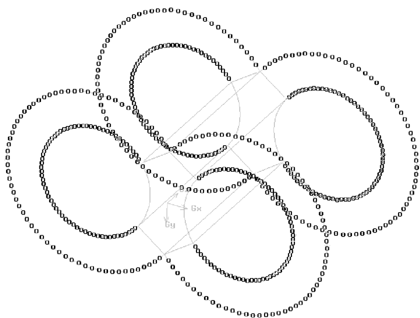


图 2-44　C 型边线网格划分

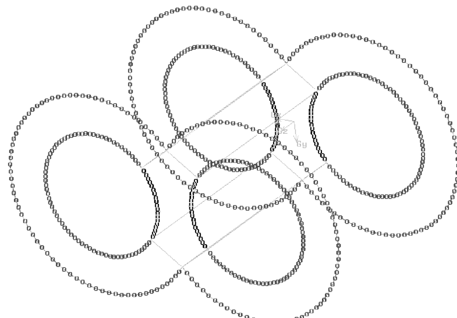


图 2-45　啮合区圆周边线网格划分结果

（2）径向线网格划分

径向的网格数量需要通过径向边线的网格划分进行控制。边界层实际上已经指定了靠近边界处的径向网格划分，还需要进一步规划中间区域的径向网格数。内外两个边界层均为 4 层，总分区数设定为 16，所以中间区域分区数为 8。径向网格规划涉及的边线如图 2-46 中箭头所指的八条边线。径向边线局部网格划分如图 2-47 所示。



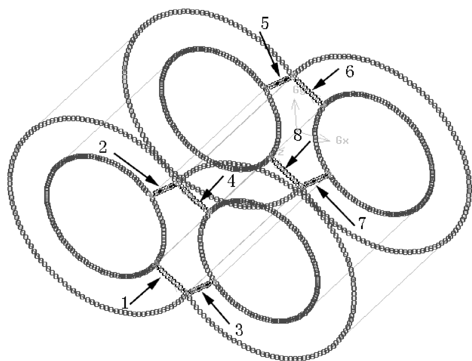


图 2-46　径向边线网格划分结果

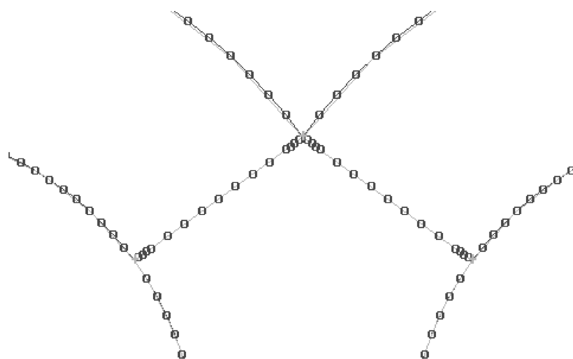


图 2-47　径向边线局部网格划分

（3）挤出方向边线网格划分

挤出方向网格划分需要在如图 2-48 所示的挤出方向边线上进行规划。该段流体区域长度为 25mm，采用 25 等分算法划分。

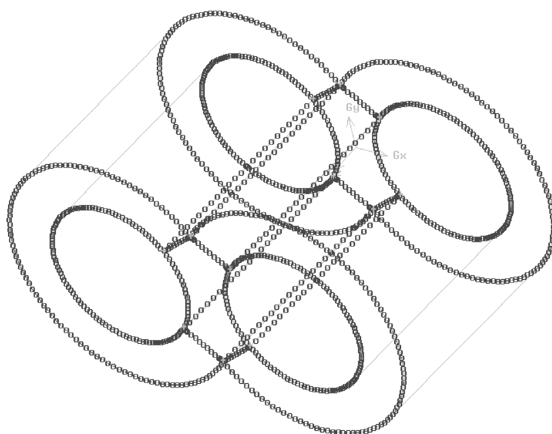


图 2-48　挤出方向边线网格划分

4. 体网格的生成

在进行线网格划分后，在三个子区域内所有对边划分的网格形式全部相同，数量一致，满足使用规则性算法的划分要求。在网格操作面板（见图 2-9）上单击体网格划分按钮 。打开如图 2-49 所示的体网格划分对话框，选中 Volumes 栏文本框，并单击右侧的向上箭头按钮 ，在出现的体列表对话框中单击 All-> 按钮，以选择所有体。选择使用六面体（Hex）类型单元和规则性网格划分算法（Map）后，单击 Apply 按钮生成体网格⊖。网格划分结果如图 2-50 所示。图 2-50 中被隐藏的边界层并没有显示出来，但是从体网格结果上可以看出，在规划边界层的位置已经进行了局部网格加密。

⊖ 由于已经在前边的步骤中将体的所有边线进行了网格规划，且使用了规则性网格划分算法，所以 Spacing 栏内设定体网格尺寸的数值将失去意义，算法将按照边界规划进行体网格划分。



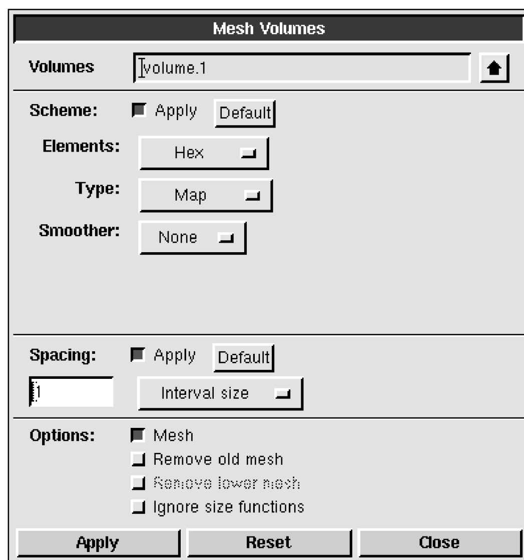


图 2-49　体网格划分对话框（六面体规则性网格）

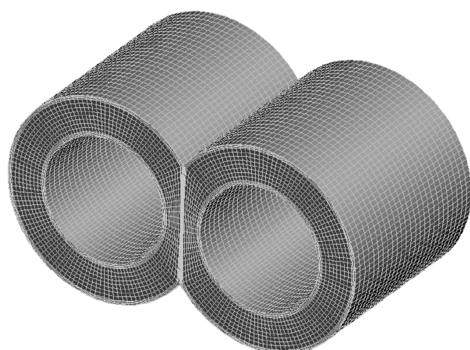


图 2-50　网格划分结果

2.3.4　边界和区域设定

从流场分析角度来看，需要指定入口、出口、两个内孔及外壁面五个边界。单击 Gambit 操作面板（见图 2-7）上的区域设定按钮，出现区域操作面板，单击边界设定按钮后，打开边界设定对话框，在 Action 栏处于选中 Add 的状态下，单击 Entity 栏内的 Faces 指定文本框，使其处于选定状态。在 Gambit 图形窗口中，按住〈Shift〉键的同时，使用鼠标左键选择组成各个边界的每个子面，然后单击该栏右侧的向上箭头，在出现的面列表对话框中核对右侧已经选中的面是否正确。确认无误后，单击 Apply 按钮，完成该组边界设定㊀。模拟中假定挤出方向与 Z 轴方向一致，所以可以根据 Z 轴方向来确定入口和出口边界。本例中，按照入口、出口、左侧内孔、右侧内孔及外壁面的顺序完成边界设定。由于计算中整个流体区域的三个子区域按照一个完整的区域进行处理，因此该区域无须进行区域指定，系统默认将所有子区域合并到一起。

2.3.5　网格文件导出

单击图 2-6 中 Gambit 菜单栏上的 File 按钮后，在其下拉菜单中选择 Export 选项，并选择 MESH 类型文件，这样将输出 NEU 类型的文件。命名为 fluid. neu，然后保存并退出 Gambit 文件。

在完成螺杆元件和流体区域的网格划分后，返回 Polyman 窗口，刷新后可以看到文件树对应 screw 和 fluid 位置均出现了“+”号，单击后可以看到里边分别出现 screw 和 fluid 两个文件，如图 2-51 所示。

㊀ 在 Gambit 图形窗口使用鼠标进行选择时，要单击面的边，往往一个边共用于两个面，会出现所选择面并非想要的面的情况，这时可使用〈Shift + 鼠标中键〉组合的方式，调整选择对象。



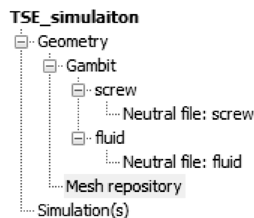


图 2-51　网格划分后的仿真目录文件树

2.4　啮合盘对应流体区域的网格划分

图 2-52 所示为啮合盘元件组合后的啮合间隙分布，可以发现，在该类元件啮合区存在两种间隙：左右两元件之间的径向间隙和相邻啮合盘之间的轴向间隙。采用 2.3 节划分的流体区域网格，由于没有考虑啮合盘轴向间隙，因此将无法描述啮合盘轴向间隙内的流动和剪切。为了解决这个问题，本节基于啮合盘元件的几何特征，对流体区域进行网格划分。

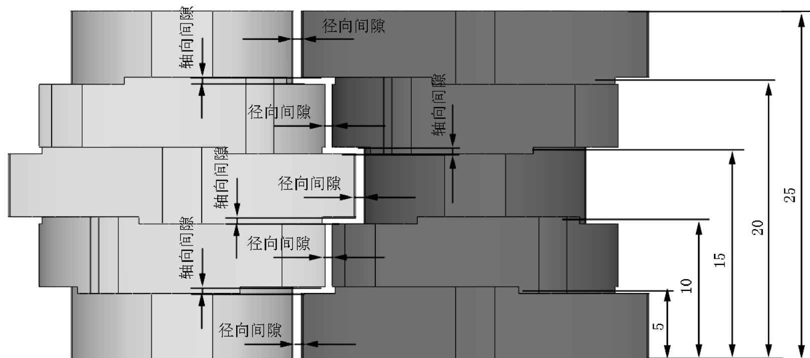


图 2-52　啮合盘元件组合后啮合间隙分布

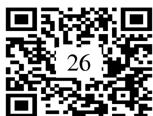
单击 Polyman 窗口工具栏中的按钮，新建 Gambit 文件，命名为 fluid_for_KD。这时文件树中 Gambit 目录内出现了一个新的 Gambit 目录。将上一节中使用的 fluid. x_t 文件，复制到 fluid_for_KD 对应的文件夹，并把该文件夹的地址作为启动 Gambit 软件的工作目录（见图 2-5）。单击 Run 按钮启动 Gambit 软件。

2.4.1　指定求解器

单击图 2-6 中 Gambit 菜单栏上的 Solver 按钮，在其下拉菜单中选择 Polyflow 求解器。设定后，在进行网格结果输出时，将输出适用于 Polyflow 求解的 NEU 类型文件。

2.4.2　几何模型导入

单击图 2-6 中 Gambit 菜单栏上的 File 按钮，在其下拉菜单中选择 Import 选项，然后从中选择 Parasolid 选项。在打开的 Parasolid 类型文件导入对话框中（见图 2-12），单击 Browse



按钮，选择 fluid. x_t 文件后单击 Accept 按钮，将文件导入。

2.4.3　体网格划分

使用六面规则性网格划分算法对流体区域进行网格划分。图 2-2 所示的流体区域几何模型几何形状相对复杂，不能直接使用规则性网格算法进行六面体网格划分，所以要对流体区域进行分区。同时还要考虑啮合盘轴向间隙内流动所需的局部网格加密的问题。

1. 啮合区与 C 形区的分割

在本节几何体分割过程中，包括两圆孔中心点生成、菱形边界生成、菱形面生成、基于 Sweep 算法的几何体生成、区域分割、多余几何体删除和多余特征点的删除等步骤。与 2.3.3 节中介绍的流程是一样的，这里不再赘述。所得结果如图 2-35 所示。

2. 轴向分区

（1）建立分切面

对于由五片啮合块组成的啮合盘元件来说，为了描述轴向间隙内的流动，需要将区域轴向分割为五个区。单击 Gambit 操作面板（见图 2-7）上的几何操作按钮，在出现的几何操作面板上单击面操作按钮，在出现的面操作面板上单击根据预定义参数创建矩形面按钮，在如图 2-53 所示的创建矩形面对话框中输入宽度和高度均为 100mm，在系统默认坐标系中选择矩形处于 XY 平面的中心（XY Centered）选项，单击 Apply 按钮则生成了一个与入口面重合的平面，如图 2-54 所示。单击面操作面板中的移动/复制面按钮，打开如图 2-55 所示的移动/复制面对话框。当 Faces 栏的文本框处于选中状态时，按住〈Shift〉键的同时，使用鼠标左键选取所建平面，并选定 Copy 选项。在 Operation 栏中选择 Translate 选项，在保持现有坐标系的情况下，在 Global 栏下输入（0，0，5）数值，单击 Apply 按钮后，则在距离原平面 5mm 的位置新建了另外一个平面，如图 2-56 所示。同样的操作再重复两次，在同一个位置建立三个重复的面。这是因为原来的流体区域几何体经 2.3.3 节操作后已经变为三个体，使用面分割时需要用三个面。

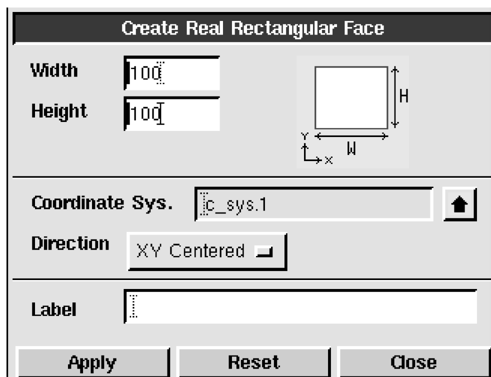


图 2-53　创建矩形面对话框

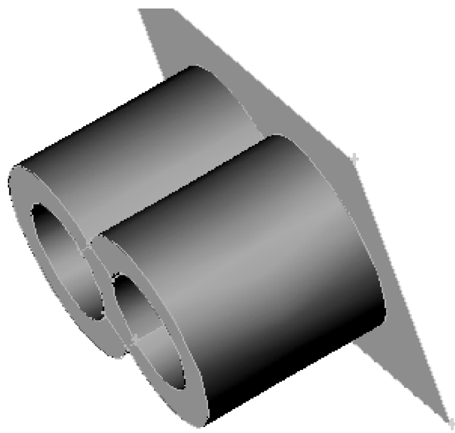


图 2-54　创建的平面



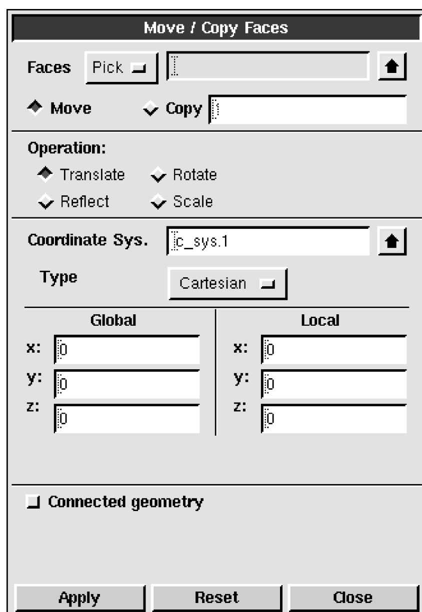


图 2-55　移动/复制面对话框

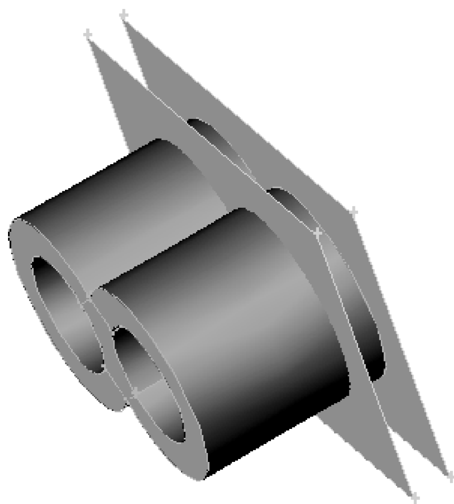


图 2-56　复制后的平面

（2）体分割

单击几何操作面板上的体操作按钮，在出现的体操作面板上单击体分割按钮，打开如图 2-57 所示的几何体分割对话框，选中被减体 Volume 栏的文本框，并按〈Shift + 鼠标左键〉组合键，在图形窗口中选中其中一个 C 形区。单击 Split With 栏中的 Volume（Real）按钮，在出现的下拉菜单中选择 Faces（Real）选项。这时该窗口底部文本框标题则由 Volumes 变为 Faces，使该文本框处于选中状态，并按〈Shift + 鼠标左键〉组合键，在图形窗口选中复制的平面。单击 Apply 按钮，则完成了该 C 形区的轴向分割。同样的操作，完成另外一个 C 形区和啮合区体的分割。分割后的几何模型如图 2-58 所示。重复上述操作过程，在（0,0,10）、（0,0,15）和（0,0,20）的位置对几何模型进行分割，分割后的几何模型如图 2-59 所示。单击几何操作面板上的面操作按钮，在面操作面板上单击删除按钮，在打开的面删除对话框中，保持 Faces 栏的文本框处于选中状态，按〈Shift + 鼠标左键〉组合键，在图形窗口中选中第一步建立的平面后，按〈Shift + 鼠标右键〉组合键进行确认，完成平面删除，结

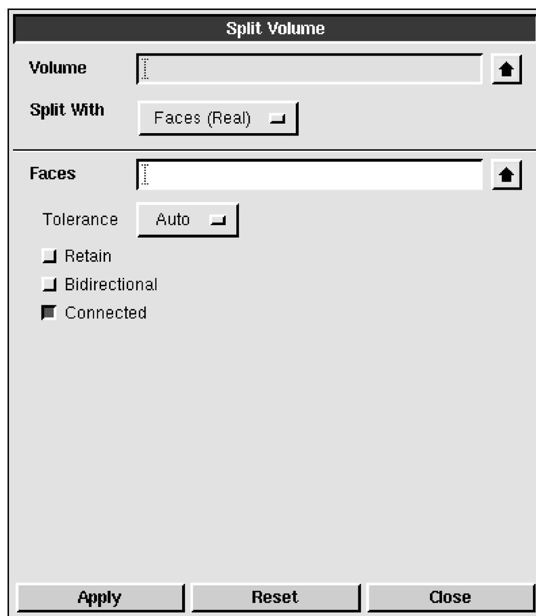


图 2-57　几何体分割对话框（面分割）

果如图 2-60 所示。

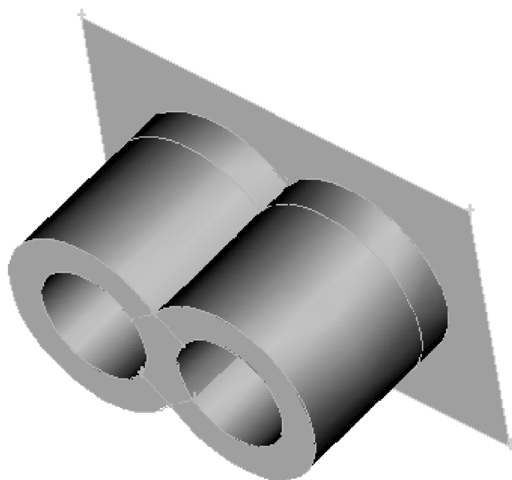


图 2-58　在 5mm 位置建立平面并进行分割后的几何模型

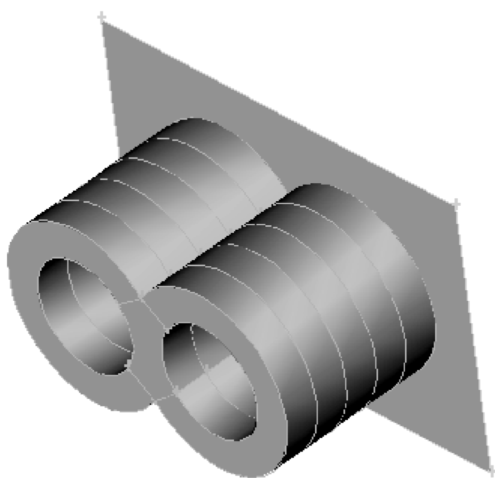


图 2-59　分割后的几何模型

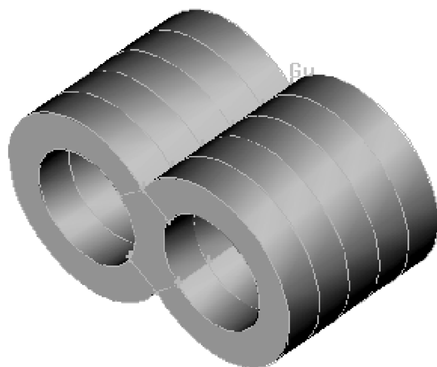


图 2-60　删除多余平面后的几何模型

3. 轴向边界层的划分

啮合盘元件轴向间隙为 0. 5mm，所以在几何模型轴向分割面两侧均需要绘制厚度为 0. 25mm 的边界层，这样可以保证轴向间隙内有足够的网格。单击 Gambit 操作面板上的网格划分工具按钮，在网格操作面板上单击创建边界层按钮，出现边界层控制面板，单击边界层设定按钮后，在如图 2-37 所示的边界层设定窗口中进行轴向边界层设定。在 Definition 栏中，采用 Uniform 均匀算法，第一行行距 First row（a）设定为 0. 0625mm，增长因子 Growth factor（b/a）设定为 1，行数 Rows 设定为 4，这样边界层总厚度 Depth（D）为



0.25mm。保持其他栏中为默认设定后，选中 Attachment 栏的文本框，按〈Shift + 鼠标左键〉组合键，在图形窗口中选中分割所形成的圆周方向边线，并确保边界层的方向为挤出方向或挤出相反方向⊖。共计选择了 24 条边线，布置了 48 条边界层网格。轴向边界层绘制结果如图 2-61 所示。

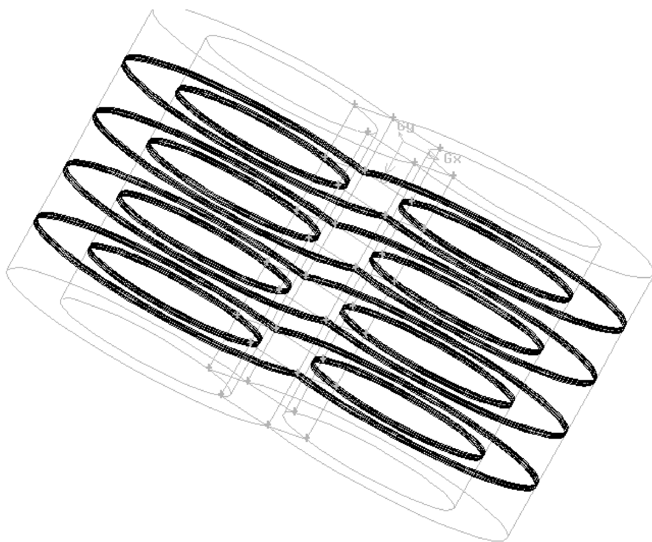


图 2-61　轴向边界层绘制结果

4. 径向边界层的划分

径向边界层的划分目的是要分析在螺杆与机筒，以及螺杆外径和螺杆根径之间间隙内的物料流动，该边界层的方向为径向。在如图 2-37 所示的边界层设定窗口中，在 Definition 栏中，采用 Uniform 均匀算法，第一行行距 First row（a）设定为 0.125mm，增长因子 Growth factor（b/a）设定为 1，行数 Rows 设定为 4，这样边界层总厚度 Depth（D）为 0.5mm。保持其他栏中为默认设定后，选中 Attachment 栏的文本框，并按〈Shift + 鼠标左键〉组合键，在图形窗口中选中所有 C 形边线（大径、小径各 12 条）以及啮合区的圆弧边线（共 12 条）。绘制结果如图 2-62 所示。

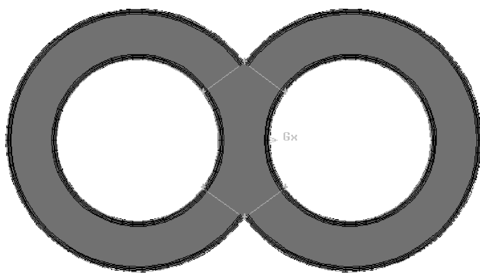


图 2-62　径向边界层绘制

为了能够清楚地规划边线上的网格，需要将已经绘制好的边界层进行隐藏。单击整体控制面板（见图 2-39）上的模型显示属性按钮，在打开的指定显示属性窗口（见图 2-40）中，单击 B. Layers 选项，并单击其对应的向上箭头按钮，在出现的边界层列表窗口（见

⊖ 本例中，所选的每一条边线均需要在沿着挤出方向和挤出相反方向布置两个边界层。在选定边界层放置边线时，需要按〈Shift + 鼠标左键〉组合键，通过选择边线的方式进行选择。如果发现选择后某个边线上的边界层方向与挤出垂直，则需按〈Shift + 鼠标中键〉组合键进行选择变换。



图 2-63）中单击 All-> 按钮，将两组边界层都选中并放入到已选择列表框中。单击 Close 按钮，返回指定显示属性窗口。选中 Visible 选项，并将其对应的 On/Off 状态选定为 Off 状态。单击 Apply 按钮，图形窗口中几何体上的边界层均被隐藏。

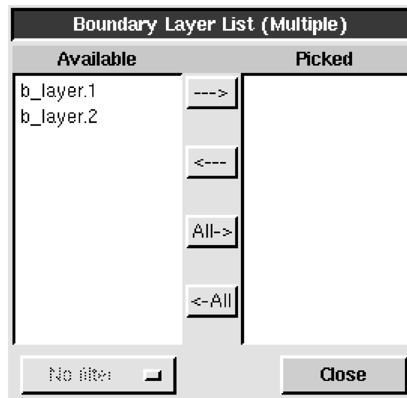


图 2-63　边界层列表窗口

5. 线网格的规划

（1）圆周方向线网格划分

与 2.3.3 节一样，圆周方向网格数量规划为 120 个，且 C 型边界和啮合区圆周边线上节点数之比为 5∶1。单击网格操作面板上的线网格绘制按钮，在出现的边网格操作面板（见图 2-42）上单击边线网格划分按钮，打开如图 2-43 所示的边网格划分对话框。在 Edges 栏的文本框处于被选中状态的情况下，按住〈Shift〉键，在 Gambit 图形窗口中使用鼠标左键选取所有的 C 型边界线（共计 24 条）。在 Spacing 栏的 Interval size 按钮上单击鼠标右键，将区间控制算法由指定分段长度算法（Interval size）转换为分区数算法（Interval count），间隔数量设定为 100。单击 Apply 按钮完成 C 型边线的网格划分，如图 2-64 所示。使用同样的方法对啮合区圆周边线（共计 12 条）进行网格划分，间隔数量设定为 20。划分结果如图 2-65 所示。

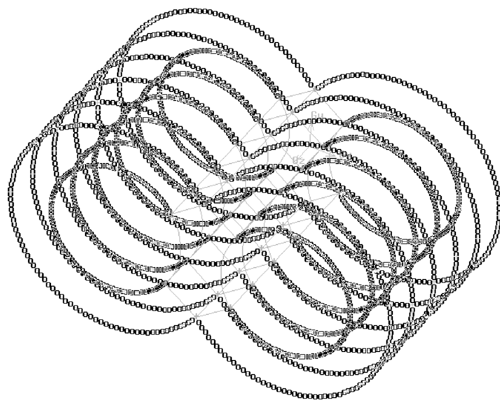


图 2-64　C 型边线网格划分

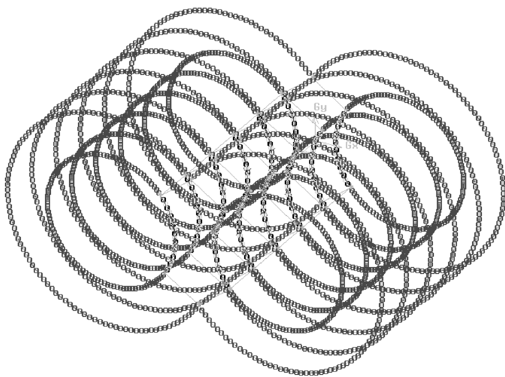


图 2-65　啮合区圆周边线网格划分结果

（2）径向线网格划分

为了能够清晰地观察径向网格划分情况，这里将圆周方向网格进行隐藏。单击整体控制面板（见图 2-39）上的模型显示属性按钮，打开指定显示属性窗口，单击 Edges 选项，并确保其后边的文本框处于选中状态。单击整体控制面板上的模型定向按钮，将图形显示窗口调整为如图 2-66 所示的模式。按住〈Shift〉键，并使用鼠标左键进行框选[⊖]。选中

⊖ Gambit 支持鼠标框选操作，从图形窗口左下或右下开始往右上或左上方向进行框选，所有完整包括在选择框中的边线会被选中；从图形窗口左上或右上开始往右下或左下方向进行框选，所有与框选区域相交的边线均被选中。



所有已经进行线网格划分的边线后，单击 Visible 选项，并将其对应的 On/Off 状态选定为 Off 状态。单击 Apply 按钮，则所有已经绘制的线网格全部隐藏。

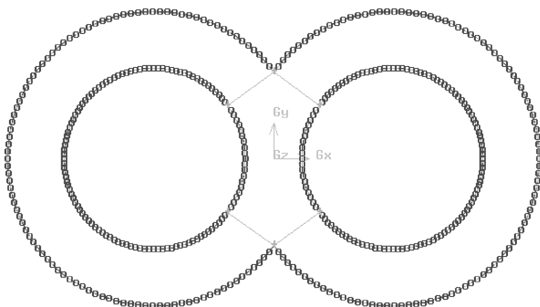


图 2-66　从 Z + 视角查看图形

径向的网格数量需要通过径向边线的网格划分进行控制。边界层实际上已经指定了靠近边界处的径向网格划分，还需要进一步规划中间区域的径向网格数。本例中，内外两个边界层均为四层，总分区数为 16，所以中间区域分区数为 8。使用框选的方式，在图 2-66 所示的视角中，选中所有径向边线（共计 24 条）进行网格划分，划分结果如图 2-67 所示。

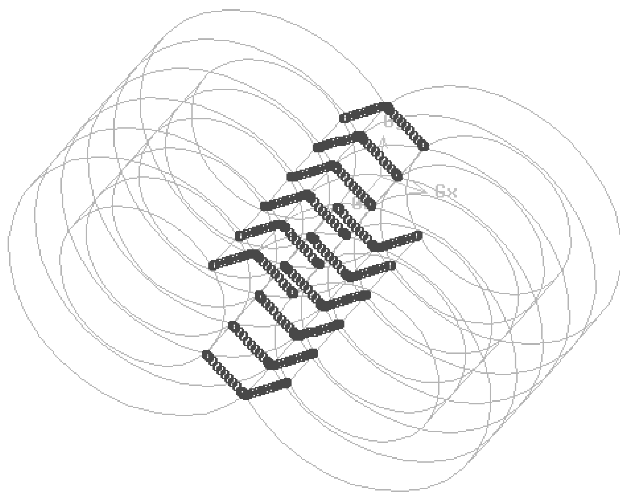


图 2-67　径向网格划分结果

（3）挤出方向线网格划分

隐藏上一步获得的径向边线网格后，从 Y + 视角观察几何模型，并使用框选的方式选择中间三段几何体对应的全部与挤出方向平行的边线。由于其上两段已经有两组四层的边界层，因此这些边线设定的总网格数为 13，这组边线上的网格划分结果如图 2-68 所示。对于两端的几何体，其上只有一组边界层，所以这些边线设定的网格总数为 9，绘制结果如图 2-69 所示。



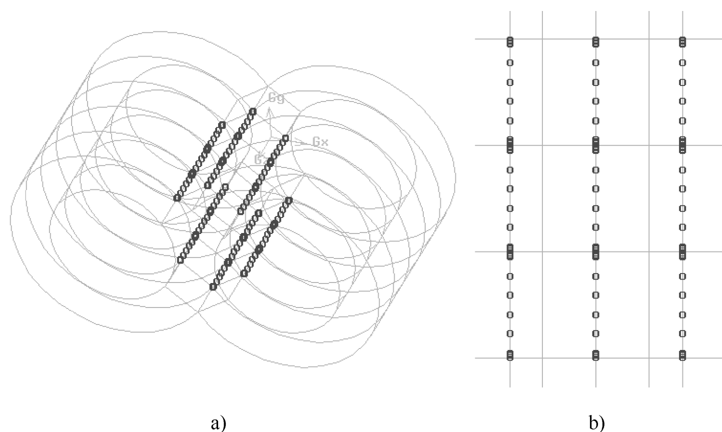


图 2-68　中间三组几何体上的轴向边线网格

a）三维效果　b）Y + 视角局部

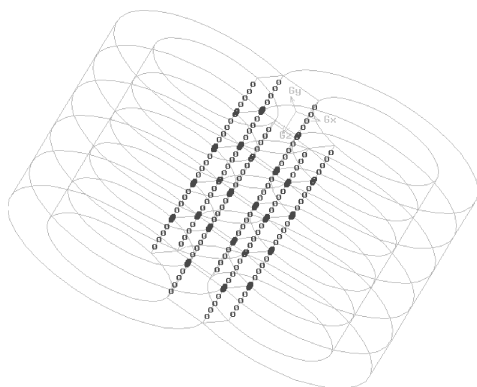


图 2-69　轴向边线网格划分最终结果

单击整体控制面板上的，打开指定显示属性窗口，首先选中 Edges 选项，然后选择所有边线，并将 Visible 选项切换到 On 状态，这样就将所有已经隐藏的线网格全部显示。随后，将隐藏的边界层全部显示，显示结果如图 2-70 所示。

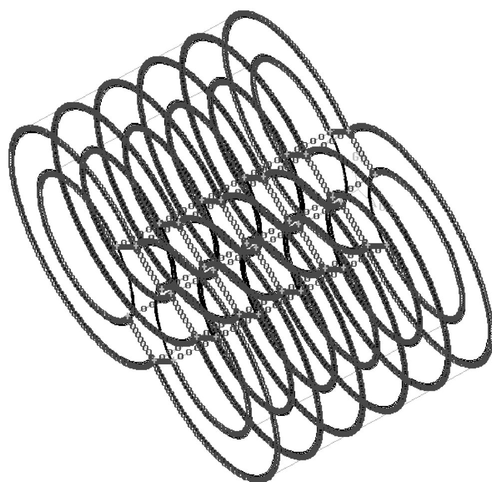


图 2-70　全部线网格和边界层均显示后的网格状态

6. 体网格的生成

在进行线网格划分后，所有子区域内的所有对边划分的网格形式全部相同，数量一致，满足使用规则性算法划分要求。在网格操作面板上单击体网格划分按钮，在打开的体网格划分对话框中，选中 Volumes 栏的文本框，并单击右侧的向上箭头按钮，在



出现的体列表对话框中单击 All-> 按钮，选择所有体。选择使用六面体 Hex 类型单元和规则性网格划分算法（Map），单击 Apply 按钮生成体网格⊖，网格结果如图 2-71 所示。

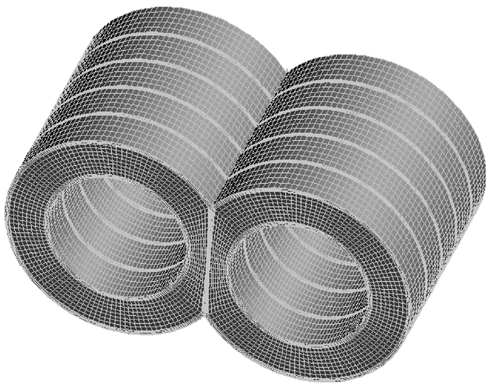


图 2-71　体网格划分结果

7. 边界和区域设定

从流场分析的角度来看，需要指定入口、出口、两个内孔及外壁面五个边界。单击 Gambit 操作面板（见图 2-7）上的边界和区域设定按钮，出现区域操作面板，单击其上的边界设定按钮后，出现如图 2-15 所示的边界设定对话框。在 Action 栏处于 Add 选中的状态下，单击 Entity 栏中的 Faces 按钮，使其文本框处于选中状态。在 Gambit 图形窗口中，按住〈Shift〉键的同时，使用鼠标左键选择组成各个边界的每个子面，然后单击该栏右侧的向上箭头按钮，在出现的面列表对话框中核对右侧已经选中的面是否正确。确认无误后，单击 Apply 按钮，完成该组边界的设定。因为模拟中任务挤出方向与 Z 轴方向一致，所以可以根据 Z 轴方向来确定入口和出口边界。本例中，按照入口、出口、左侧内孔、右侧内孔及外壁面的顺序完成边界设定。由于计算中整个流体区域的 15 个子区域按照一个完整的区域进行处理，因此该区域无须进行区域指定，系统默认将所有子区域合并到一起。

8. 网格文件导出

单击 File 按钮后，在其下拉菜单中选择 Export 选项，并选择 MESH 类型文件，这样将输出 NEU 类型的文件，命名为 fluid_for_KD. neu，然后保存并退出 Gambit 文件。

2.5　网格文件格式转换及组合

2.5.1　格式转换

鼠标单击生成的 NEU 文件后，按〈Ctrl + C〉快捷键进行复制操作，然后单击 Mesh repository 文件树位置，再按〈Ctrl + V〉快捷键进行粘贴操作，这时将出现如图 2-72 所示的添加新项（Add new item）对话框。分别在 Name 栏里输入 S. msh 和 F. msh，完成对 Screw. neu 和 Fluid. neu 的转换。

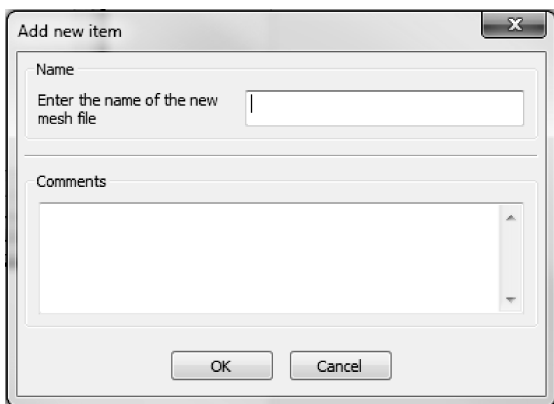
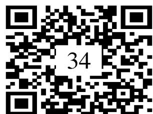


图 2-72　添加新项对话框

完成转换后，系统将给出网格转换信息，在如图 2-73 所示的转换信息对话框内，

⊖ 由于已经在前边的步骤中将体的所有边线进行了网格规划，且使用规则性网格划分算法，因此所有 Spacing 栏内设定体网格尺寸的数值将失去意义，算法将按照边界规划进行体网格划分。



给出了单元数、节点数、计算区域数、边界数、各个分区单元数、边界中单元边界面数以及几何体整体几何信息（包括区域尺寸、中心点位置以及包含该几何体最小六面体的两个主对角线顶点的坐标）。从转换信息中可以看出，螺杆元件部分的网格数和节点数分别为 11739 和 3233，流体区域部分的网格数和节点数分别为 96000 和 105534㊀。

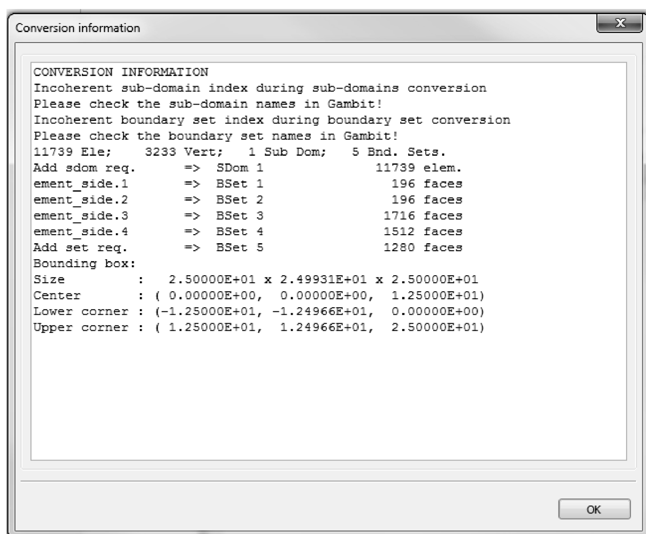


图 2-73　转换信息对话框

2.5.2　网格组合

完成转换后，双击 S. msh 文件，启动 Polyfuse 模块窗口（见图 2-74）。在 Polyfuse 模块内，将完成计算使用的 MSH 文件的导入、比例缩放、平移、旋转及组合等操作。

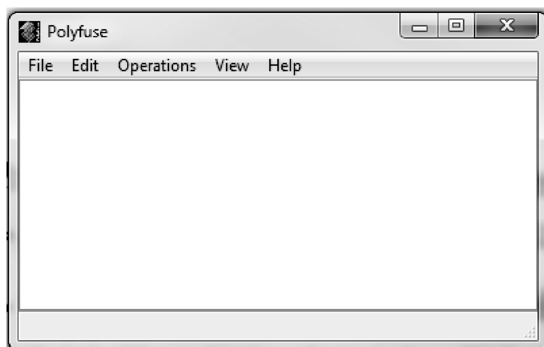


图 2-74　Polyfuse 模块窗口

1. 导入

单击 Polyfuse 窗口中的 File 菜单，选择 select meshes 命令，在弹出的读取网格文件对话

㊀ 在使用 Polyflow 计算时，某些同学往往关注划分了多少网格，而忽略了节点总数。实际上，在使用有限元方法进行计算时，总体刚度矩阵的行（列）数与流体区域节点数相匹配。节点数才是表征计算资源消耗量的实际指标。



框（见图 2-75）中单击 Import（导入）按钮，分别导入一次 F. msh 文件和两次 S. msh 文件。导入后 Polyfuse 的图形窗口的显示状态如图 2-76 所示。

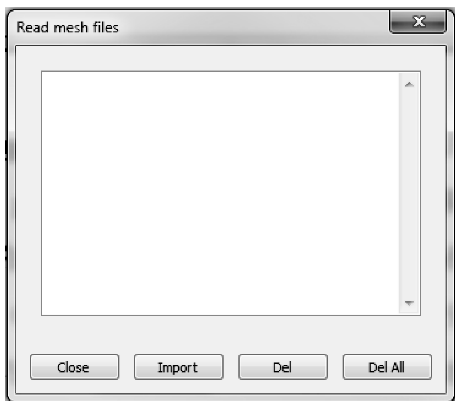


图 2-75　读取网格文件对话框

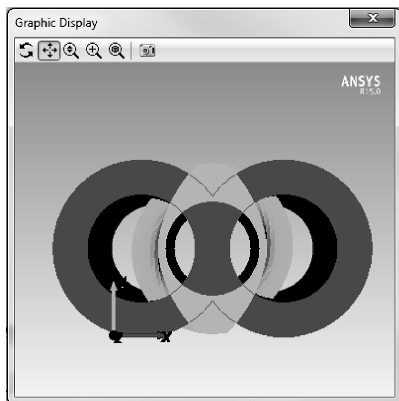


图 2-76　图形窗口的显示状态

2. 平移

在 Polyfuse 网格文件列表栏单击其中一个 S. msh 文件，选择 Operations 菜单栏中的 Translate（平移）选项，在打开的平移操作对话框（见图 2-77）中，输入（10. 5,0,0）数据，将螺杆元件移动到 X 轴正向旋转中心处。使用同样的方法，将另一个螺杆元件平移到 X 轴负向旋转中心处。

3. 旋转

选择第二个螺杆元件，选择 Operations 菜单栏中的 Rotate（旋转）选项，在打开的旋转操作对话框（见图 2-78）中，输入旋转角度 90°，旋转中心设定为（－10. 5,0,0）。这样，将螺杆元件在（－10. 5,0,0）处绕 Z 轴转动 90°。

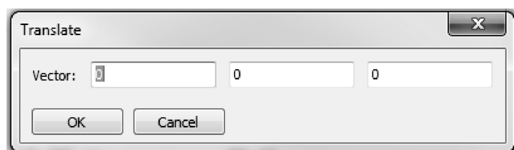


图 2-77　平移操作对话框

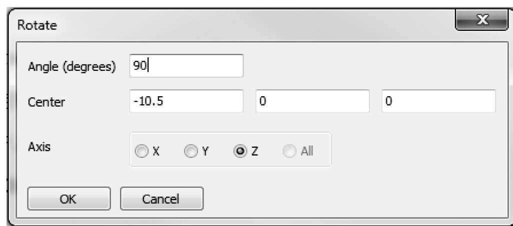


图 2-78　旋转操作对话框

4. 缩放

选择 Operations 菜单栏中的 Scale 选项，在打开的缩放操作对话框（见图 2-79）中依次将三个几何体以 0. 001 的比例进行缩小。这是因为在建立三维模型时，比较习惯以 mm 为单位，而在流场计算中最好将单位统一到 m 制国际单位。例如，螺杆直径为 25mm，缩小后的数值为 0. 025，其单

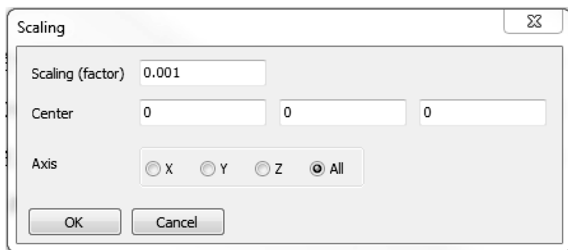


图 2-79　缩放操作对话框



位为 m。值得注意的是，螺杆元件缩放时，其中心应为（0.0105,0,0）和（−0.0105,0,0）。

完成平移、旋转和缩放操作后，Polyfuse 窗口中显示了完整的网格文件处理过程，如图 2-80 所示。

5. 网格组合

完成上述操作后，单击 File 菜单中的 Write Mesh 命令，系统会提示给新生成的 MSH 文件命名，本例中将 MSH 文件命名为 TSE_mesh. msh。这时系统会出现如图 2-81 所示的信息，提示是否将所有区域和所有边界合并为一个区域和一个边界。这里不需要合并，所以单击 No 按钮。这样就生成了一个可用于后续计算的网格文件。

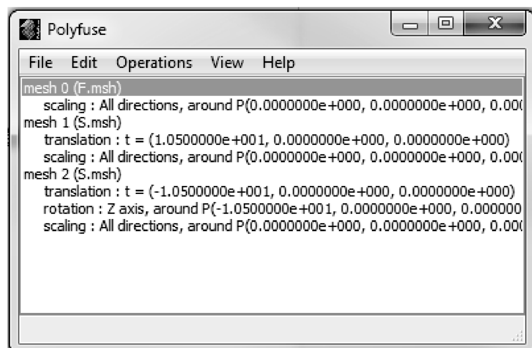


图 2-80　完整的网格文件处理过程

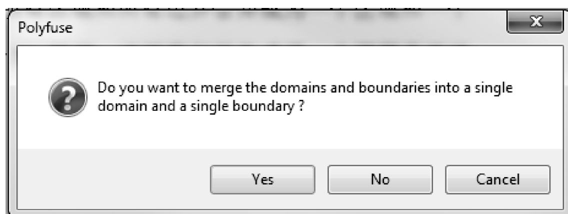


图 2-81　Polyfuse 系统提示

6. 流程文件的保存

在退出 Polyfuse 模块窗口之前，单击 File 菜单中的 save 命令，将过程文件保存为 TES. fus 文件[⊖]。其中，TES 为文件名，可以根据网格文件的具体情况进行命名。这个文件存储了整个网格组合操作的过程，如果在后续的 Polydata 操作中发现组合的网格需要修改，那么在启动 Polyfuse 后，单击 File 菜单中的 Open 命令，选择 TES. fus 文件，则可以打开之前的设定流程，便于修改。

思　考　题

1. 在啮合盘元件的流场仿真中，如果使用螺纹元件对应的流体区域网格文件进行计算，可能存在什么问题?
2. 对应由七片组成的错列角为 30°的啮合盘元件，流体区域网格该如何划分?
3. 对应由四片组成的错列角为 60°的啮合盘元件，流体区域网格该如何划分?

⊖ 要养成保存 FUS 文件的习惯，特别是对复杂网格问题，在进行网格文件修改时，从 FUS 文件打开之前的设定流程，可以减少重复步骤的设定时间。



第 3 章 双螺杆等温瞬态流动问题的有限元求解

本章以瞬态仿真为例，讲解使用 Polyflow 软件进行双螺杆挤出过程仿真的设定过程。在获得流场结果后，使用 FieldView 后处理软件对流场结果进行提取和观察。此外，在瞬态问题 DAT 文件的基础上完成稳态问题的设定。本章还将对网格重叠技术进行介绍。为了便于系列化问题的仿真设定，本章还将讲解模拟参数表格的建立和使用方法。

3.1 流场仿真任务的创建

在 Polyman 窗口中单击新建仿真（simulation）按钮 S，将仿真任务命名为 TSE_01_time_depd_isothermal⊖。在文件树的 Mesh repository 节点中选中上一章生成的 TSE_mesh. msh 文件，按〈Ctrl + C〉快捷键进行复制，然后单击新建的仿真名，再按〈Ctrl + V〉快捷键进行粘贴，将网格文件放入到仿真任务文件树内。此时，文件树如图 3-1 所示。

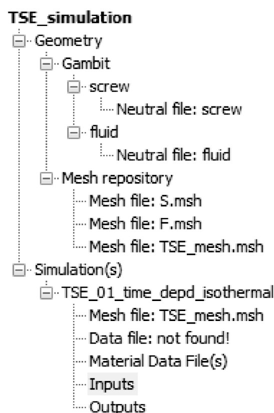


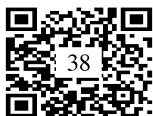
图 3-1　新建仿真任务后的文件树

3.2 流场计算任务的设定过程

3.2.1 流场任务的创建及其类型的设定

双击 msh 文件，进入 Polydata 模块（见图 3-2），开始对仿真任务进行设定。在图 3-2 中

⊖ 仿真任务的名称应尽可能表明任务的功能，因为一个工程下可能存在一系列任务，通过名称可以最直接地了解任务的功能和性质。



单击 Create a new task（创建新任务）选项，进入创建新任务页面（见图 3-3）。本仿真为与时间有关的有限元计算任务㊀，需单击 F. E. M. task（有限元任务）和 Time-dependent problem（s）（与时间有关的问题）两个选项。单击 Accept the current setup（接受当前设定）选项后，进入如图 3-4 所示的 F. E. M. task 1（有限元任务 1）设定页面。

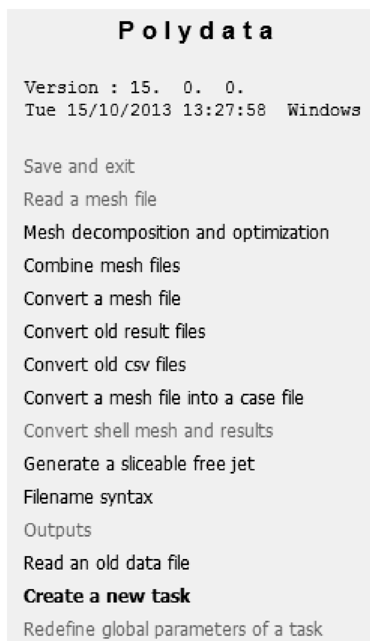


图 3-2　Polydata 模块

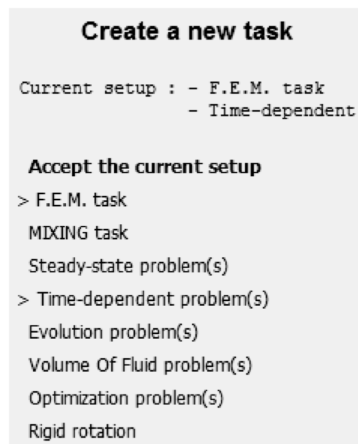


图 3-3　创建新任务页面（设定后的状态）

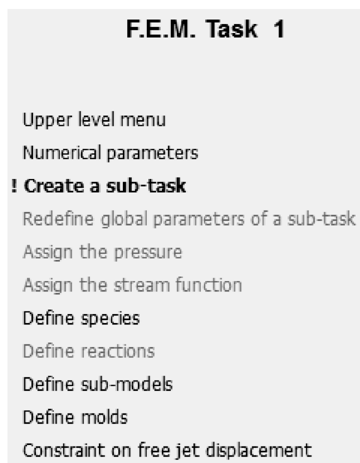


图 3-4　有限元任务 1 设定页面

㊀ 这里的“与时间有关”实际上是考虑螺杆旋转运动情况下的流场计算。值得注意的是，每个位置上输出的结果均为该位置上速度充分发展的结果。



3.2.2 瞬态等温流场子任务的设定

单击图3-4中的！Creata a sub-task（创建子任务）选项，进入Create a sub-task（创建子任务）页面（见图3-5）。该子任务为广义牛顿等温流动问题，所以选择Generalized Newtonian isothermal flow problem选项。将子任务命名为TSE_isothermal后，进入TSE_isothermal子任务设定页面（见图3-6）。

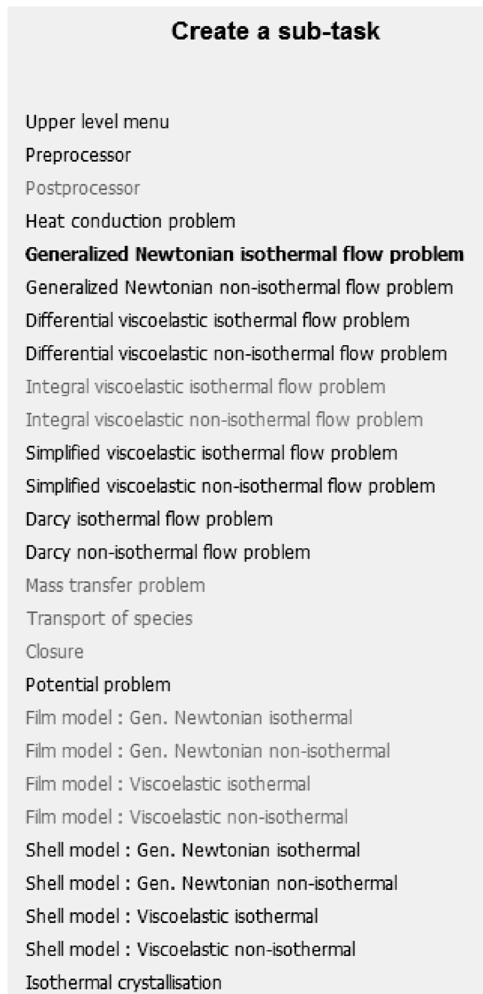


图3-5　创建子任务页面

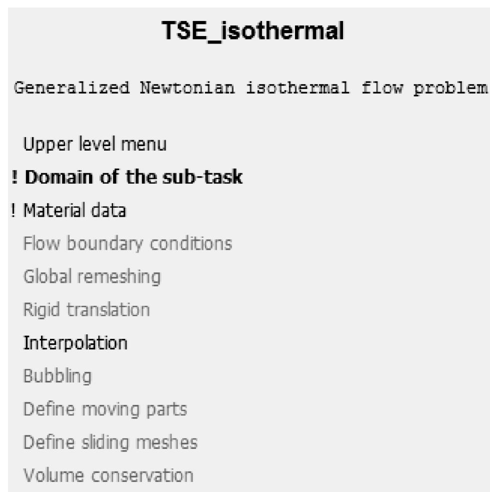


图3-6　TSE_isothermal子任务设定页面

1. 计算区域的设定

单击图3-6中的！Domain of the sub-task（子任务计算区域设定）选项，进入Domain of the sub-task（子任务区域设定）页面（见图3-7）。该页面分为上下两个区域：选定区和待选区。将流体区域（Add sdom req）放置到选定区，将两个螺杆元件（Add sdom re2和Add sdom re3）放置到待选区。设定完成后，单击Upper level menu（返回上级菜单）按钮，返回如图3-6所示的TSE_isothermal子任务设定页面。





图 3-7　子任务区域设定页面（完成设定后）

2. 物性参数及系统单位制设定

单击图 3-6 中的！Material data（物性参数设定）选项，进入物性参数设定页面（见图 3-8）。本例中流体属于非牛顿流体，由 Bird-Carreau 本构方程来描述其流变特性：

$$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty)(1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}} \qquad (3\text{-}1)$$

式中，零切黏度 η_0 为 1000Pa · s；无穷大剪切速率下黏度 η_∞ 为 1Pa · s；松弛时间 λ 为 3s；幂率指数 n 为 0.45；$\dot{\gamma}$ 为剪切速率，单位为 s^{-1}；η 为物料黏度，单位为 Pa · s。

单击图 3-8 中的 Shear-rate dependence of viscosity（与剪切速率有关的黏度）选项，进入 Shear-rate dependence of viscosity（与剪切速率有关的黏度本构方程类型选择）页面（见图 3-9），选择其中的 Bird-Carreau law 选项。在如图 3-10 所示的 Bird-Carreau law 参数设定页面中，给出了本构方程的表达式，其中各个参数与式（3-1）中的各个参数相对应：f(g) 对应 η，fac 对应 η_0，facinf 对应 η_∞，tnat 对应 λ，expo 对应 n，g 对应 $\dot{\gamma}$。完成设定后，返回 Material Data 设定页面，这时系统出现如图 3-11 所示的提示。这是因为幂率指数 expo，即

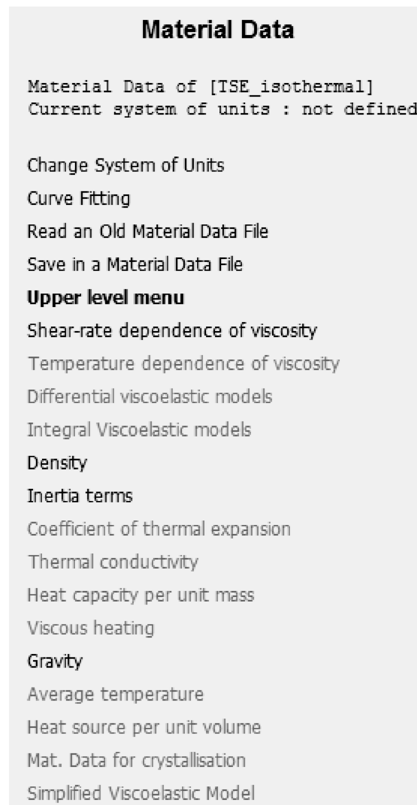


图 3-8　物性参数设定页面



式（3-1）中的 n 小于 0.75，计算问题属于非牛顿特性较强的非线性问题，所以系统提示使用如下三种方法之一，以便于计算的收敛：

1）使用 Picard 插值法进行黏度迭代计算。

2）对幂率指数进行演变算法计算。

3）对入口流率数值进行演变算法计算。

本例中选择第一种方法，在后续内容中设定。

在如图 3-8 所示的物性参数设定页面中，选择 Change System of Units（改变单位制）选项，进入 Change System of Units 页面（见图 3-12），选择！Define current system of Units 选项，在出现的 Current System of Units（当前单位制）页面（见图 3-13）中可以看到当前单位制为国际制单位 m-kg-s-K-A，本例中保持默认设置。

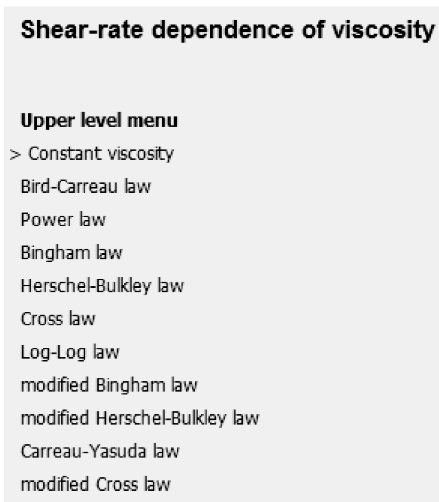


图 3-9 与剪切速率有关的黏度本构方程类型选择页面

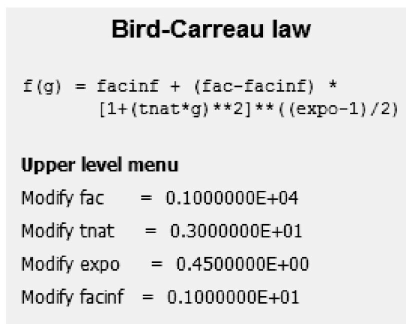


图 3-10 Bird-Carreau law 参数设定页面（设定后）

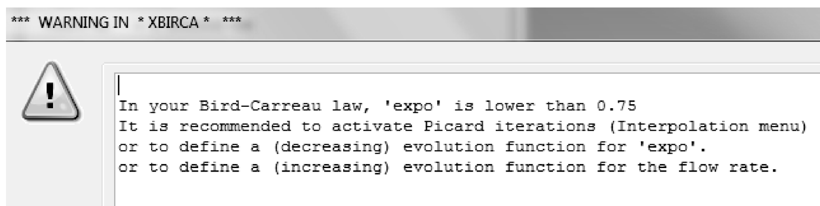


图 3-11 有关幂率指数小于 0.75 的提示

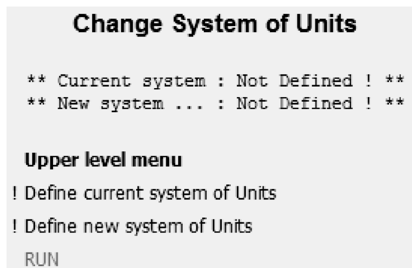


图 3-12 改变单位制页面



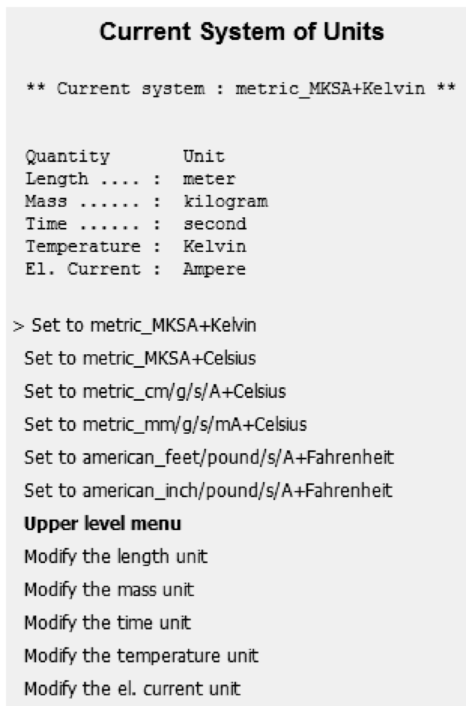


图 3-13　当前单位制页面

3. 流动边界条件设定

返回如图 3-6 所示的 TSE_isothermal 子任务设定页面，此时图 3-6 所示页面中原本为灰色不可选状态的几个选项变成了黑色可选状态。单击！Flow boundary conditions（流动边界条件）选项，系统出现如图 3-14 所示的关于密度和惯性的提示：TSE_isothermal 子任务中，在仿真任务为瞬态类型的情况下，建议对密度进行赋值，并考虑惯性的影响。在本例中设定密度为 0，且不考虑惯性的影响。这是因为在当前加工条件下，物料的黏性力作用远远大于惯性力作用，可以忽略惯性作用的影响。所以，针对以上提示本例不做处理。单击 OK 按钮后，进入 Flow boundary conditions（流动边界条件）设定页面（见图 3-15）。为了区分入口和出口，在 Polydata 窗口的 Graphcial Window 下拉菜单中选择 Axes 子菜单中的 show axes 选项，在图形窗口中打开坐标轴，如图 3-16 所示。沿 Z 轴方向即为挤出方向。选择入口边界，单击 Modify 按钮，在出现的如图 3-17 所示的边界条件类型页面中，选择 Normal and tangential forces imposed（fn，fs）（施加法向力和切向力）选项，并将 fn 和 fs 均赋值为 0，这样的边界条件说明流体区域入口流体为自由流动⊖。同样，出口边界也施加 fn 和 fs 均为 0 的边界条件。对于左右两个内孔，设定 vn = 0 和 fs = 0 的边界条件，这种类型的边界条件属于滑移边界，不仅没有流体能够贯穿该边界流动，而且该边界上的流体所受的切向力为 0。对于

⊖　入口和出口边界条件与模型有关。当流体区域长度比螺杆元件长度长，且在流体区域入口边界和螺杆元件靠近入口端面之间、流体区域出口边界和螺杆元件靠近出口端面之间保留一定距离的情况下，可以使用 inflow 边界条件给定入口流率和 outflow（即 fn = vs = 0）的边界条件。但是本例中，螺杆元件端面与流体区域端面重合，使用以上两种边界条件会因螺杆元件端面的影响而造成计算误差。这种情况下使用文中 fn = fs = 0 的边界条件。



外壁面给定 vn = vs = 0 的边界，表示壁面无滑移。

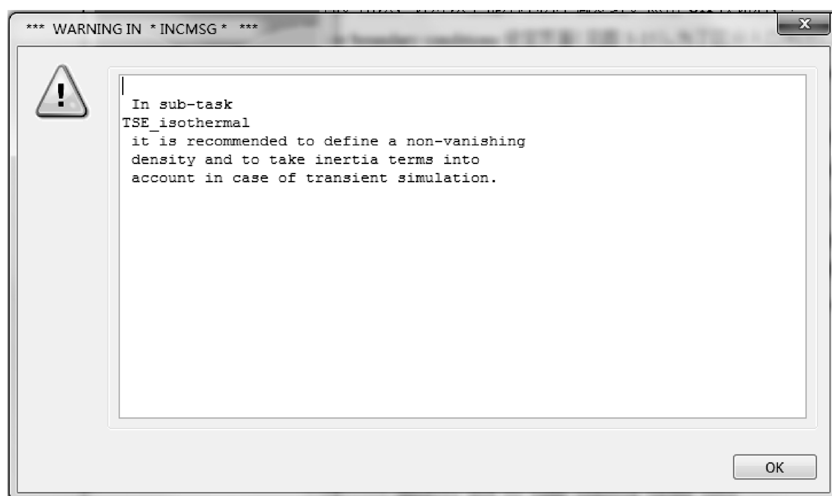


图 3-14　有关密度和惯性的提示

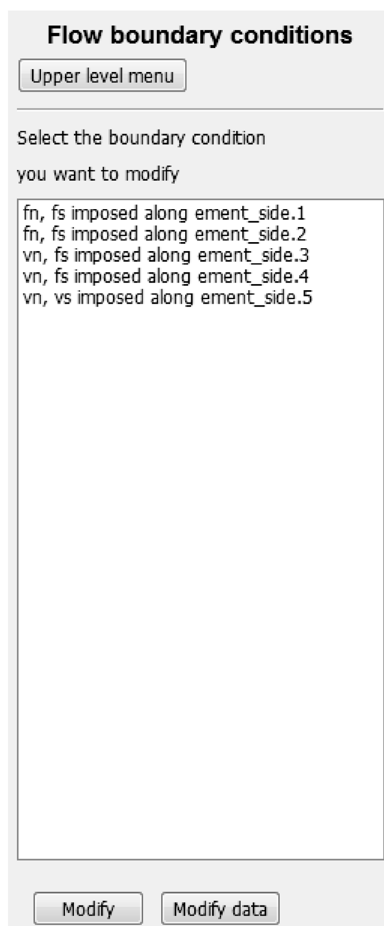


图 3-15　流动边界条件设定页面（设定后的状态）



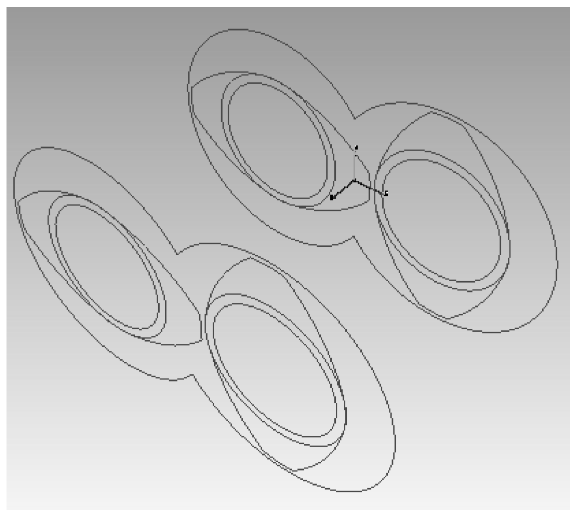


图 3-16　开启坐标轴

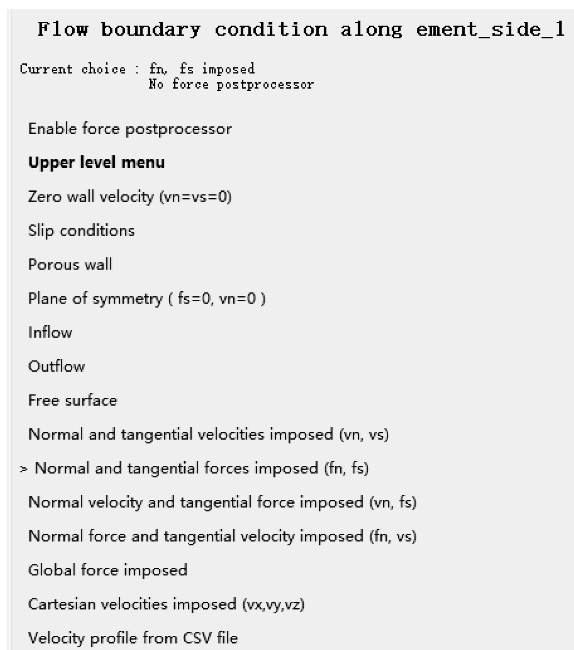
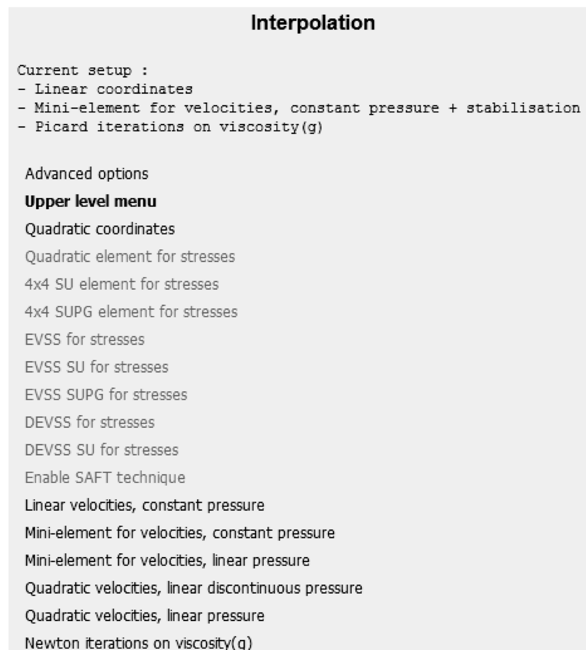


图 3-17　边界条件类型页面（设定后的状态）

4. 插值设定

返回如图 3-6 所示的 TSE_isothermal 子任务设定页面，单击 Interpolation（插值）选项，进入如图 3-18 所示的插值设定页面。根据之前有关幂率指数小于 0.75 的提示，在这步选择 Picard iterations on viscosity（g）选项，在黏度迭代中使用 Picard 迭代算法。保持其他选项为默认插值类型。




Interpolation

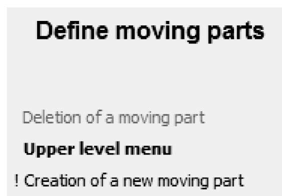
Current setup :
- Linear coordinates
- Mini-element for velocities, constant pressure + stabilisation
- Picard iterations on viscosity(g)

Advanced options
Upper level menu
Quadratic coordinates
Quadratic element for stresses
4x4 SU element for stresses
4x4 SUPG element for stresses
EVSS for stresses
EVSS SU for stresses
EVSS SUPG for stresses
DEVSS for stresses
DEVSS SU for stresses
Enable SAFT technique
Linear velocities, constant pressure
Mini-element for velocities, constant pressure
Mini-element for velocities, linear pressure
Quadratic velocities, linear discontinuous pressure
Quadratic velocities, linear pressure
Newton iterations on viscosity(g)

图 3-18　插值设定页面（设定后的状态）

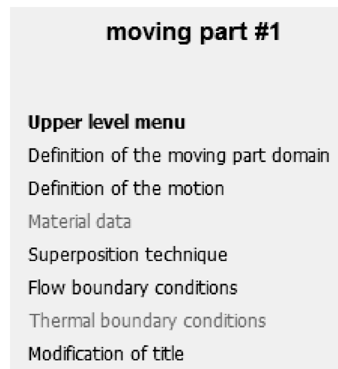
5. 运动部件的设定

返回如图 3-6 所示的 TSE_isothermal 子任务设定页面，单击 Define moving parts（定义运动部件）选项，进入如图 3-19 所示的运动部件设定页面。单击！Creation of a new moving part（创建一个新的运动部件）选项，进入如图 3-20 所示的 moving part #1（运动部件#1）设定页面。


Define moving parts

Deletion of a moving part
Upper level menu
! Creation of a new moving part

图 3-19　运动部件设定页面


moving part #1

Upper level menu
Definition of the moving part domain
Definition of the motion
Material data
Superposition technique
Flow boundary conditions
Thermal boundary conditions
Modification of title

图 3-20　运动部件#1 设定页面

单击图 3-20 中的 Definition of the moving part domain（运动部件区域设定）选项，进入如图 3-21 所示的 Domain of the moving part（运动部件区域设定）页面，将应放置在 X 轴正向旋转中心位置的螺杆元件（Add sdom re2）从待选区添加到选定区。

单击 Upper level menu 按钮返回运动部件#1 设定页面（见图 3-20），单击 Definition of the



motion（运动部件运动设定）选项，进入如图 3-22 所示的运动定义页面，其中运动设定参数包括：point of rotation axis（旋转轴原点坐标）、orientation of rotation axis（local）（旋转轴方向）、angular velocity（角速度）、initial angle of rotation（初始转角）、translation velocity（平移速度）、initial translation vector（初始平移向量）、initial rotation angle theta（Z axis）（初始绕 Z 轴转角 θ）、initial rotation angle phi（Y axis）（初始绕 Y 轴转角 φ）、angular velocity Vtheta（Z axis）（绕 Z 轴转动角速度 V_θ）、angular velocity Vphi（Y axis）（绕 Y 轴转动角速度 V_φ）。本例中需定义前三项：旋转轴原点坐标（0.0105，0，0），单位为 m；旋转轴方向（0，0，1）；螺杆转速为 −60r/min⊖。其他参数均设定为 0，且需要保持 the moving part coordinates are updated（更新运动部件坐标）选项为选中状态。

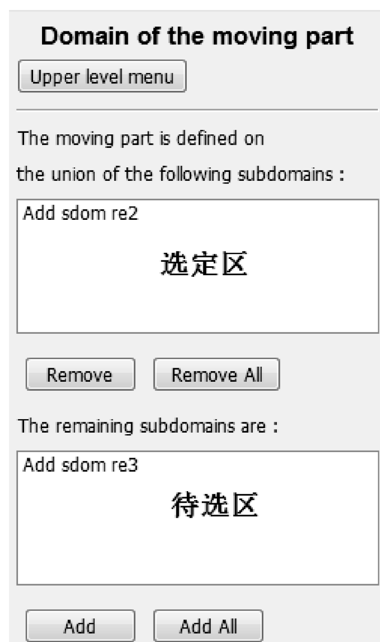


图 3-21　运动部件区域设定页面（设定后的状态）

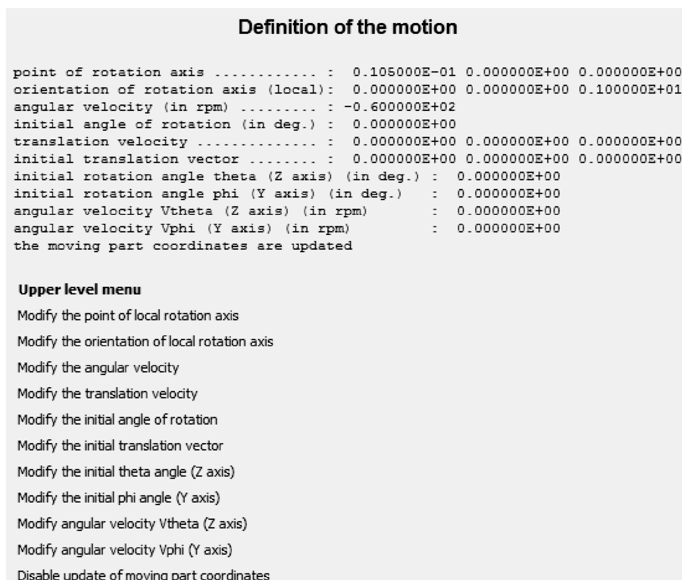


图 3-22　运动定义页面（设定后的状态）

在完成第一个运动部件设定后，返回更新后的运动部件设定页面（见图 3-23）。单击

⊖ 运动部件旋转角速度的方向由数值的正负区分，正负的判断以右手定则为准。以本例为例，右手拇指与挤出方向一致，如螺杆旋转方向与四指攥拳方向一致，则角速度取值为正，反之为负。



Creation of a new moving part 选项后，出现如图 3-24 所示的系统提示，提示是否复制现有运动部件的参数，即是否在现有运动部件的基础上设定新的运动部件。因为另外一个螺杆元件与第一个螺杆元件有相似性，所以单击 Yes 按钮。在如图 3-25 所示的现有运动部件列表中单击 moving part #1（运动部件#1）选项，进入如图 3-26 所示的 moving part #2（运动部件#2）设定页面。选定运动部件区域后，在运动设定页面中只需修改旋转轴原点坐标为（-0.0105,0,0）。其他参数将继承运动部件#1 的参数。

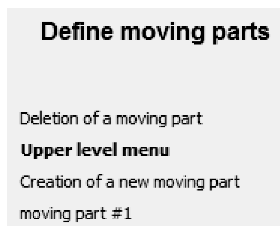


图 3-23　更新后的运动部件设定页面

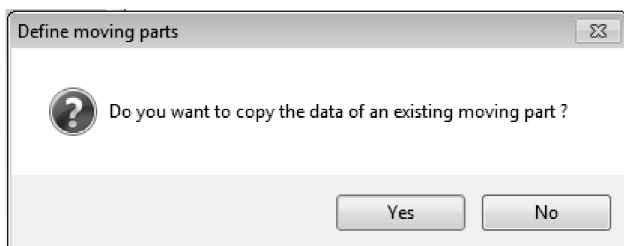


图 3-24　关于建立新的运动部件的系统提示

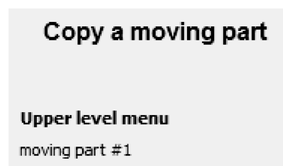


图 3-25　现有运动部件列表

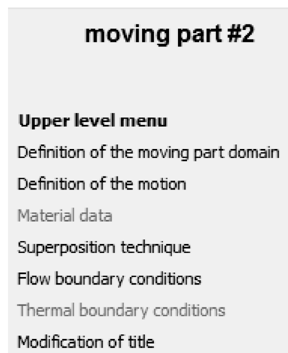
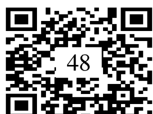


图 3-26　运动部件#2 设定页面

3.2.3　数值参数的设定

返回如图 3-4 所示的有限元任务 1 设定页面，单击 Numerical parameters（数值参数）选项，进入如图 3-27 所示的 Numerical parameters（数值参数）设定页面。



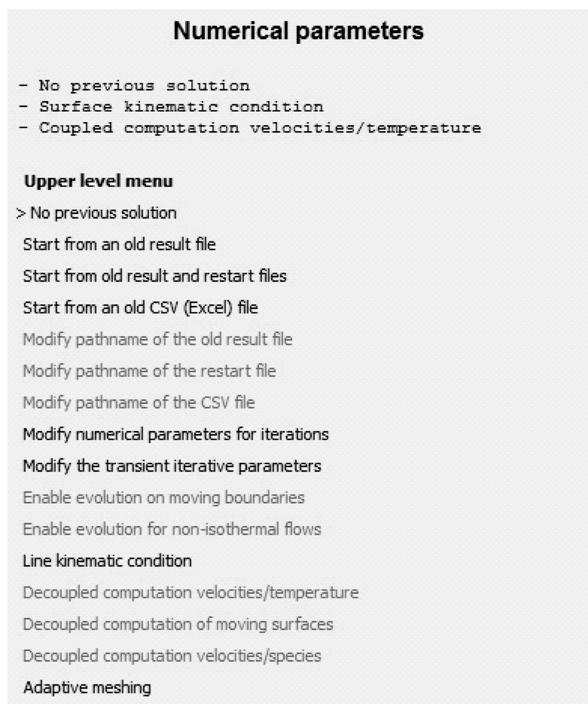


图 3-27　数值参数设定页面

1. 瞬态任务时间参数设定

在数值参数设定页面中单击 Modify the transient iterative parameters（编辑瞬态迭代参数）选项，进入瞬态迭代参数设定页面（见图 3-28），其中包括 Initial time value（初始时间）、Upper time limit（时间上限）、Initial value of the time step（初始时间步长）、Min admissible value of the time-step（最小时间步长）、Max admissible value of the time-step（最大时间步长）、Tolerance for time marching（时间匹配误差）、Max number of successful steps（最大连续计算步数）和使用算法等选项。运动部件转速为 60r/min，由于螺杆元件为双头对称结构，且忽略惯性作用的影响，因此从运动部件的相对相位及流场状态来看，螺杆元件转动 180°后又回到初始位置。在初始时间为 0 的情况下，转动 180°所需的时间为 0.5s，所以时间上限为 0.5s。在计算中螺杆元件每转动 6°输出一个结果，即每隔 1/60s 输出一个结果，所以初始时间步长和最大时间步长都设定为 1/60s。最小时间步长是计算是否收敛的依据，在迭代计算中，如果按照最大步长计算，无法得到收敛结果，那么系统会自动将步长减半，直到获得收敛结果为止。如果时间步长在减半过程中已经小于最小时间步长设定的数值，则系统将停止计算，并在 listing 文件中输出相关报错信息。通常情况下，将最小时间步长设定为最大时间步长的 1/100，本例中设定为 1/6000s。有关时间匹配精度，本例先保持默认数值 0.01，在退出数值参数设定页面时，系统将给出如图 3-29 所示的提示：由于运动部件的存在，系统自动将时间匹配误差设定为一个较高的值。单击 OK 按钮后，系统会自动将该参数调整为 10000。有关最大连续计算步数选项，本例将系统默认的 200 改为 2000。这个数值并不代表系统将执行 2000 步计算，而是说明如果计算步数超过 2000 次，则系统将停止计算。如果正



常计算只需要 1000 步，则系统仅执行 1000 步计算。该数值修改大的原因是该流场计算任务相对复杂，可能会进行多步计算，防止由于该数值过小而造成系统自动停止。本例选用默认的隐式欧拉方法进行积分计算，更多关于算法的内容，请参考 Polyflow 的帮助文件。

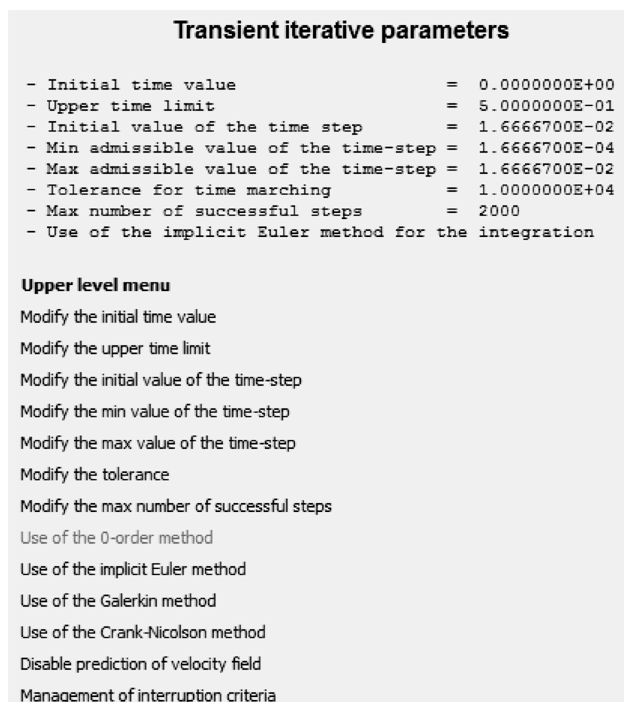


图 3-28　瞬态迭代参数设定页面

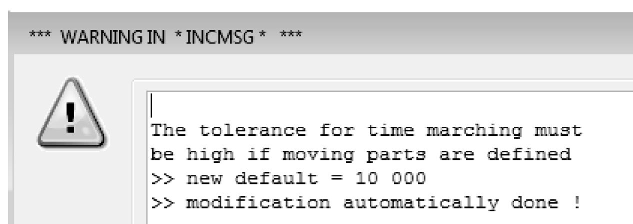


图 3-29　关于时间匹配误差的系统提示

2. 迭代参数设定

返回如图 3-27 所示的数值参数设定页面，单击 Modify numerical parameters for iterations（迭代数值参数）选项，进入如图 3-30 所示的迭代数值参数设定页面。虽然本例保持这组参数为体系默认数值，但还是要说明这组参数的含义：Modify the max number of iterations 为每一次收敛计算所允许的最大迭代次数；Modify the convergence test 为相对误差收敛判断参数，求解过程中所有场量的相对变化量都小于这个数值时表示收敛；Modity the divergence test 为发散判断参数，如果最大保守相对误差比设定值大，则表明计算不收敛。图 3-30 所示的最后一行为使用的算法。系统提供六种算法，从适用性角度来看，分为六个层级，适用性从高到低依次为：the classic direct solver、the AFM direct solver、the AFM direct solver + secant、



the AFM direct solver + ILU、the AFM direct solver + ILU + secant 和 the multigrid iterative solver⊖。

Numerical parameters for iterations

Upper level menu
Modify the max number of iterations = 30
Modify the convergence test = 1.0000000E-03
Modify the divergence test = 1.0000000E+03
Modify the solver agressivity = 2 (very robust)
==> solver type = AMF direct solver

图 3-30　迭代数值参数设定页面

3.2.4　后处理子任务的设定

为了对流场进行分析，需要获得更多的流场输出结果。返回如图 3-4 所示的 F. E. M. Task 1（有限元任务 1）设定页面，单击 Create a sub-task 选项，系统提示是否复制现有子任务的数据，也就是说是否在现有子任务的基础上建立新的子任务。如果存在与现有子任务类似的子任务，就可以单击 Yes 按钮，复制现有子任务数据之后，在此基础上修改参数，可简化子任务设定过程。本例当前要设定后处理子任务，它与 TSE_isothermal 子任务没有相似性，所以单击 No 按钮。进入如图 3-5 所示的 Create a sub-task（创建子任务）页面，原本为灰色的 Postprocessor（后处理）选项已经处于黑色可选状态，单击 Postprocessor 选项进行后处理任务设定。命名子任务为 shear rate 后，进入子任务变量选择页面（见图 3-31），选择 Local shear-rate 选项后，系统提示将在名为 Add sdom req 的流体区域内进行计算（见图 3-32）。当再次建立后处理子任务时，可以在现有 shear rate 子任务的基础上完成设定。单击 Postprocessor 选项，在系统提示对话框内单击 Yes 按钮，系统提示对后处理子任务进行命名，随后完成变量选择。本例中，后处理子任务包括剪切速率（Local shear rate）、变形速率张

shear rate

Postprocessor :
Local shear-rate

Upper level menu

Viscosity
Rate of deformation tensor
Inelastic stress tensor
Viscous heating and dissipated power
Total extra-stress tensor
Residence time
Tracking of material points
Tracking of a material property
Forces on slices
Heat Fluxes
Flow Rate and Balance
Joule Effect
Mixing Index
Vorticity
Convected Heat
Parison thickness
Volume of liquid
Thickness evaluation

图 3-31　子任务变量选择页面

⊖ 适用性较低的算法对于某些特定求解问题具有特别的针对性。Polyflow 提供了六种迭代求解器：①经典直接求解法是基于几何分解的多前锋直接求解法；②AFM 直接求解法是基于数学分解和优化的多前锋计算方法，①和②两种算法相比，AMF 直接求解器计算更快，但对计算机的内存容量要求更高；③迭代计算中，割线法（Secant Method）可与 AMF 算法一起使用，多次重复使用分解矩阵，同时升级方程的右侧向量，计算中的内存消耗明显降低，但计算的迭代步骤明显增加；④另外一种降低计算消耗的方式是 ILU 方法，使用这一方法时将忽略系数矩阵中的小项，因为矩阵的带宽降低，所以因式分解的消耗降低，另外，这一方法并不处理右侧向量，从收敛角度来看，求解结果与经典直接求解法和 AMF 直接求解法一致；⑤将割线法和 ILU 方法同时结合到计算中，将进一步降低对计算资源的消耗；⑥最后一种求解器是基于数学的多网格算法，使用该求解器时要多加小心，因为其只适合于几何形状固定的广义牛顿流体计算。



量（Rate of deformation tensor）、黏度（Viscosity）、混合指数（Mixing Index）、黏性热和耗散功（Viscous heating and dissipated power）、非弹性应力张量（Inelastic stress tensor）等六个。其中在选择 Inelastic stress tensor 选项后，还需选定其扩展输出：张量特征值（tensor eigenvalues）和张量沿速度方向分量（tensor comp. along velocity）。利用这些后处理子任务生成的场量可实现对流场的深入量化评价。

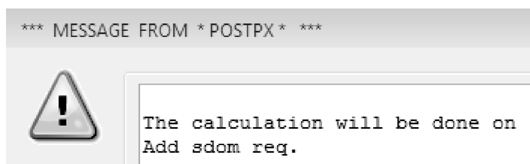


图 3-32　关于后处理任务计算区域的系统提示

例如，对于不可压缩广义牛顿流体来说，变量含义如下。

变形速率张量定义为

$$D_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\quad (i,j=1,2,3) \tag{3-2}$$

剪切速率定义为

$$\dot{\gamma}=\sqrt{2(D^2)} \tag{3-3}$$

混合指数定义为

$$\lambda=\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}+\omega} \tag{3-4}$$

式中，ω 为涡旋量的大小。平推流，$\lambda=0$；纯剪切流动，$\lambda=0.5$；纯拉伸流动，$\lambda=1$。

非弹性应力张量定义为

$$T=\begin{pmatrix}\sigma_x-\sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz}\\ \tau_{yx} & \sigma_y-\sigma_m & \tau_{yz}\\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z-\sigma_m\end{pmatrix} \tag{3-5}$$

其三个特征值：

$$I_T=\mathrm{tr}(T)=(\sigma_x-\sigma_m)+(\sigma_x-\sigma_m)+(\sigma_x-\sigma_m) \tag{3-6}$$

（对于不可压缩流体，$I_T=0$）

$$II_T=\mathrm{tr}(T^2)=\frac{1}{6}[(\sigma_x-\sigma_y)^2+(\sigma_y-\sigma_z)^2+(\sigma_z-\sigma_x)^2+6(\tau_{xy}^2+\tau_{yz}^2+\tau_{zx}^2)] \tag{3-7}$$

$$III_T=\det(T)=(\sigma_x-\sigma_m)(\sigma_y-\sigma_m)(\sigma_z-\sigma_m)+2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx}-(\sigma_x-\sigma_m)\tau_{yz}^2-(\sigma_y-\sigma_m)\tau_{zx}^2-(\sigma_z-\sigma_m)\tau_{xy}^2 \tag{3-8}$$

黏性热定义为单位体积、单位时间内的生热，其单位为 J/（s·m³）。

耗散功定义为黏性热在计算区域内的积分，其单位为 W。

3.2.5　结果输出的设定

返回 Polydata 设定页面（见图 3-2），单击 Outputs 选项，在如图 3-33 所示的输出设定页面内选择 FieldView 和 Polyflow 两种输出结果类型。然后单击 Output Triggering（输出触发）



选项，在如图 3-34 所示的输出触发设定页面内选择 Output at exact dt，以在精确时间步长点上进行结果输出，dt interval 时间步长值设定为 1/60（约为 0. 0166667） s。

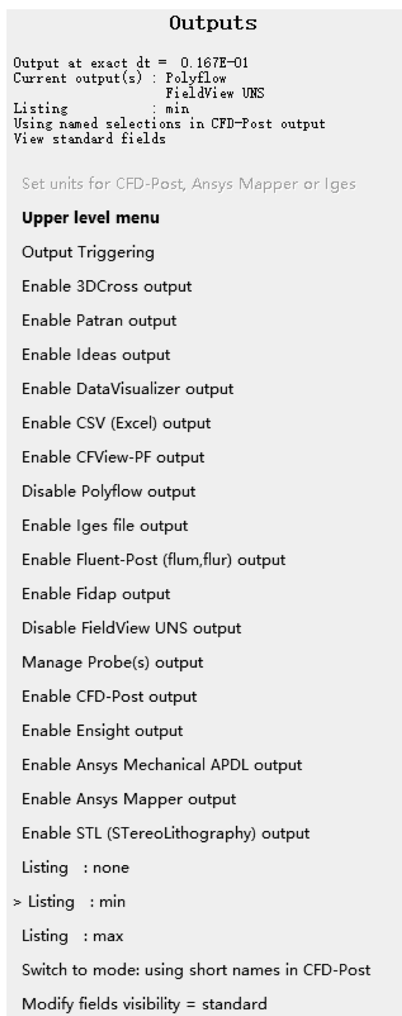


图 3-33　输出设定页面（设定后的状态）

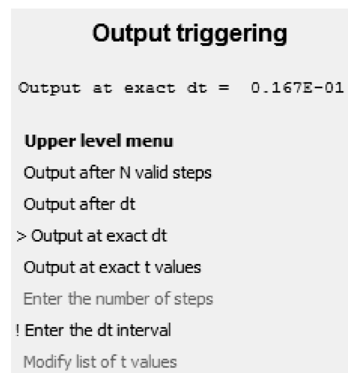


图 3-34　输出触发设定页面（设定后的状态）

3. 2. 6　流场输出管理

在退出 Polydata 的过程中，会出现 Field Management（场变量管理）页面（见图 3-35），这里可以选择 F. E. M Task 1 任务计算完成后输出结果中所包含的场变量，默认 VELOCITIES（速度）、PRESSURE（压力）、INSIDE #i（运动部件内部）、LOCAL SHEAR-RATE（局部剪切速率）、TENSOR D（变形速率张量）、VISCOSITY（黏度）、MIXING INDEX（混合指数）、VISCOUS HEATING（黏性热）、TENSOR T（非弹性应力张量）、EIGENV_i（张量 T 的特征值）和 vTv（张量 T 沿速度方向的分量）为选中状态，而 field MVPTs_Velocity（运动部件的速度场）为待选状态。



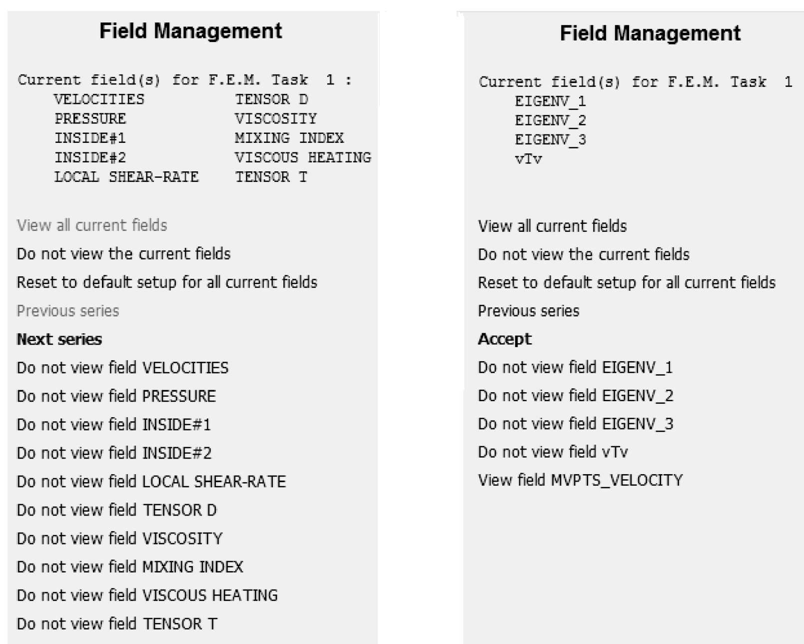


图 3-35　场变量管理页面

3.2.7　文件管理

继续退出过程中，会出现如图 3-36 所示的文件管理页面，在这里可以设定输出结果（res）文件、重新启动（rst）文件、Polyflow 类型结果（res_2）文件以及 Field-View 类型结果（fv）文件的文件名。这里保持默认设定。



图 3-36　文件管理页面

3.2.8　程序运行

完成设定后，退出 Polydata 窗口，返回 Polyman 窗口。单击工具栏中的刷新按钮，文件树中出现新生成的 dat 文件，如图 3-37 所示。选中文件树中的 TSE_01_time_depd_isothermal 任务后，单击 Polyman 中的 tools 下拉菜单，选择 options 子菜单中的 Polyflow 选项，在出现的 Polyflow 求解器设定对话框（见图 3-38）中设定求解过程中使用的 CPU 核数（Number of processor）。本例中，将其设定为 4 核 CPU 并行计算。完成求解器设定后，单击 polyman 窗口中的运行按钮，运行 Polyflow 进行计算。

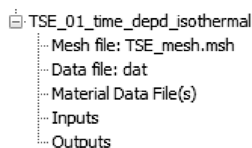


图 3-37　更新后的文件树



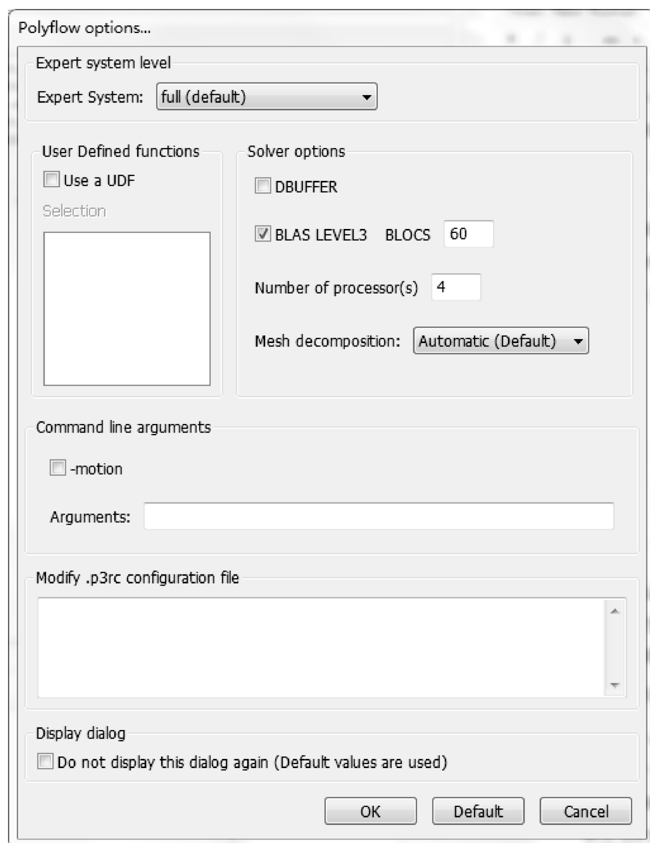


图 3-38　Polyflow 求解器设定对话框（设定后的状态）

在 Polyman 窗口的 listing 文件显示栏中（见图 3-39），单击 Simulation 栏后的下拉菜单，选择当前模拟任务名称，并取消勾选 Show only last 200 line 复选框，单击右侧的刷新按钮，更新 listing 文件显示状态。也可以勾选 Refresh every 10 seconds 复选框，即每隔 10s 更新一次，系统完成 listing 文件显示的自动更新。图 3-40 给出了 listing 文件中的部分显示信息，包括当前求解步数、瞬态任务对应时间、运动部件运动参数、计算警告、边界流率、总耗散功、运动部件受力状态及时间步长参数等。

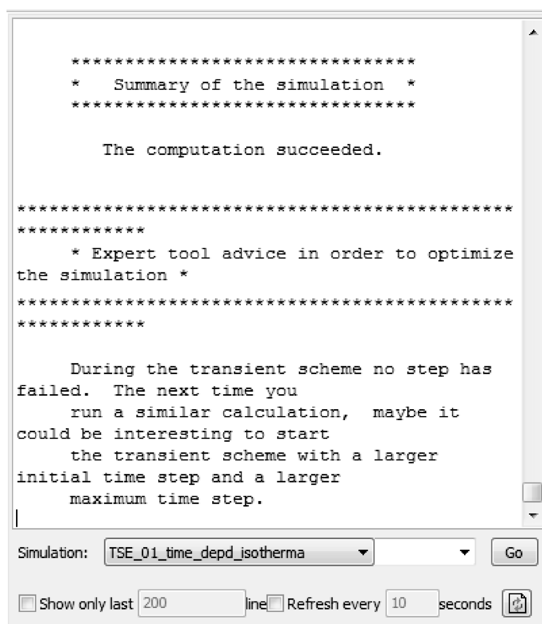


图 3-39　Polyman 窗口的 listing 文件显示栏



```
***************************
***   Starting Step 7   ***
***************************
  Parameters and Fields                          |   Progress bar(s)  |
Time =                      0.1166669E+00     |====>               |
Field PHI_ANG_#1         =  0.0000000E+00
Field THETA_AN#1         =  0.0000000E+00
Field ALPHA_AN#1         = -0.1166669E+00
Field TRANSLAT#1         = ( 0.0000000E+00,  0.0000000E+00,  0.0000000E+00 )
Field PHI_ANG_#2         =  0.0000000E+00
Field THETA_AN#2         =  0.0000000E+00
Field ALPHA_AN#2         = -0.1166669E+00
Field TRANSLAT#2         = ( 0.0000000E+00,  0.0000000E+00,  0.0000000E+00 )
```

a)

```
*** WARNING *** from [Check_overlapping]
   Elements overlapped by several moving parts have been detected !
   This situation can lead to pressure peaks and fluid leakage.
   It is recommended to refine the flow domain mesh in those areas
   or to check the position of the moving parts !
```

b)

```
   Flow rates

   Flow rate = -0.3856544E-005   on (Add sdom req*ement_side.1).
   Flow rate =  0.3856432E-005   on (Add sdom req*ement_side.2).
   Flow rate =  0.1943774E-020   on (Add sdom req*ement_side.3).
   Flow rate = -0.5727780E-020   on (Add sdom req*ement_side.4).
   Flow rate =  0.0000000E+000   on (Add sdom req*ement_side.5).
```

c)

```
   Total dissipated power

   Dissipated power =  0.9239646E+000   on Add sdom req.
```

d)

```
Force and Torque on moving part #1

      force  = (-0.1133889E+00 , -0.5309682E+00 , -0.1345016E+01)

      torque = ( 0.8387066E-02 , -0.4763763E-02 ,  0.8428053E-01)

      reference point = ( 0.1050000E-01 ,  0.0000000E+00 ,  0.0000000E+00)


Force and Torque on moving part #2

      force  = ( 0.1626733E+00 ,  0.2697012E+00 , -0.1350752E+01)

      torque = ( 0.1087200E-02 ,  0.5571275E-02 ,  0.8456309E-01)

      reference point = (-0.1050000E-01 ,  0.0000000E+00 ,  0.0000000E+00)
```

e)

```
*** time step information : ***
===============================
t     =  0.1166669E+00, step #7
dtnew =  0.1666670E-01, okincr = T
tests =  0.1443691E+01
```

f)

图3-40　listing文件中的部分计算信息

a）当前求解步数、瞬态任务对应时间、运动部件的运动参数　b）计算警告　c）边界流率
d）总耗散功　e）运动部件受力状态　f）时间步长参数



3.3　使用 FieldView 软件观察流场结果

本节讲述使用 FieldView 软件观察流场计算结果的方法，主要包括五部分内容：结果文件的导入及显示窗口初始化、边界场值云图的设定方法、瞬态数据的动态显示设定方法、截面内的速度向量分布的设定方法、数值曲线的绘制方法。

3.3.1　结果文件的导入及显示窗口初始化

1. 结果文件的导入

启动 FieldView 软件后，导入上一节计算获得的 FieldView 类型结果文件。单击 File 菜单中的 Data input 选项，在子菜单中选择 Unstructured 选项，打开如图 3-41 所示的 FV Unstructured（文件读取）对话框。

单击图 3-41 中的 Read Grid or Combined Data 按钮，在出现的文件浏览器中找到 TSE_01_time_depd_isothermal 仿真任务中 Outputs 目录里的 fv1.uns 文件。选中该文件后，单击 Open 按钮，在打开的如图 3-42 所示的场量列表选择对话框中，单击 Select All 按钮，选择所有场量按钮后，单击 OK 按钮，打开如图 3-43 所示的 Transient Set（瞬态设定）对话框。其中提示是否将该系列的 30 个结果文件按照瞬态系列文件导入。单击 Yes 按钮，完成文件导入后，单击图 3-41 中的 Close 按钮，关闭文件读取对话框。

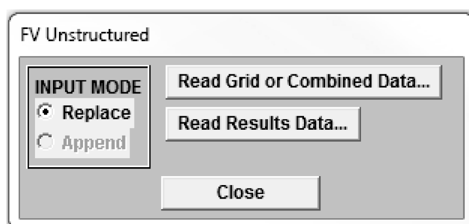


图 3-41　文件读取对话框

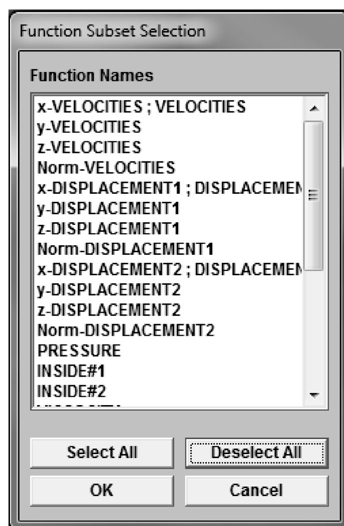


图 3-42　场量列表选择对话框

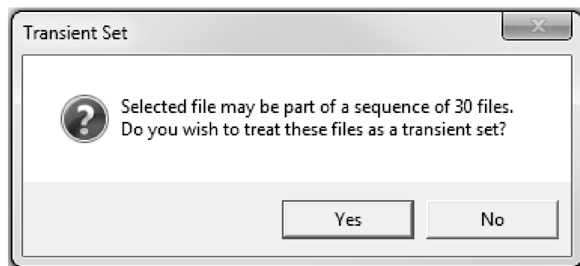


图 3-43　瞬态设定对话框

2. 显示窗口初始化

此时，FieldView 软件的图形窗口为黑色背景，其中有白色区域轮廓线，且视角为远景模式（Perspective）。



（1）将背景颜色由默认的黑色变为白色

单击 View 菜单中的 Background Color（背景颜色）选项，在如图 3-44 所示的颜色选择对话框中单击白色按钮后，单击 OK 按钮确认，背景颜色即转变为白色。

（2）将视角转换为正视模式

在 View 菜单中，将 Perspective 选项前面的对钩去掉，视图即转换为正视显示模式。

（3）将区域轮廓框关闭

在 View 菜单中，将 Outline 选项前面的对钩去掉，区域轮廓框即关闭。

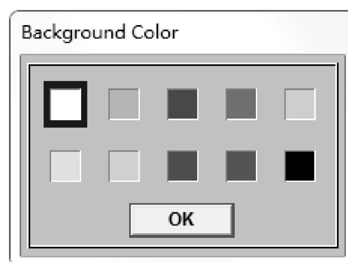


图 3-44　颜色选择对话框

3.3.2　流体区域边界上的剪切速率分布

单击左侧工具栏中的边界按钮，进入如图 3-45 所示的边界表面设定对话框。该页面中包括四个分页面，分别为 Surface 子页面、Subset 子页面、Colormap 子页面和 Legend 子页面。

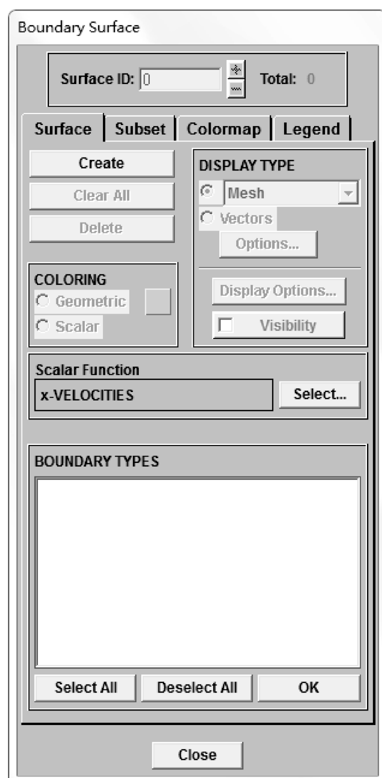


图 3-45　边界表面设定对话框

单击 Surface 子页面（见图 3-45）中的 Create 按钮，创建一个新的显示层。这时在图 3-45 中的 BOUNDARY TYPES 栏中出现了包含三个区域所有边界的列表。如前所述，流体区域包



括五个边界，选择列表中对应的五个边界后，单击 OK 按钮。为了清楚起见，本例在 COLORING 栏中选择 Geometric 选项，并单击其后的颜色按钮，在打开的颜色选择对话框中单击黑色按钮，然后单击 OK 按钮确认。这时图形窗口显示如图 3-46 所示，当前显示状态为流体区域边界的黑色网格模式。

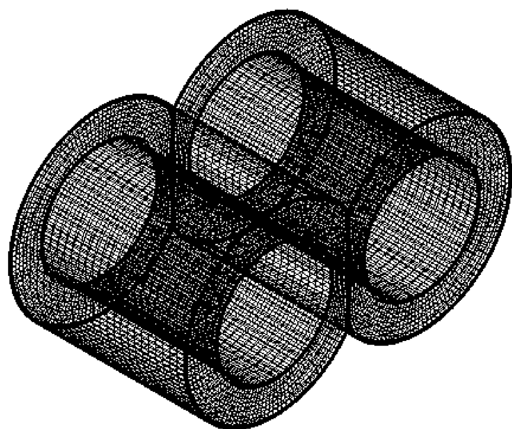


图 3-46　图形窗口显示状态（边界网格模式）

在 Surface 子页面中的 DISPLAY TYPE 栏内选择第一选项，并在其下拉菜单中选择 Smooth 平滑模式。在 COLORING 栏中选择 Scalar 选项。单击 Scalar Function 栏中的 Select 按钮，在出现的场量列表（见图 3-47）中选择 LOCAL_SHEAR-RATE（局部剪切速率）选项，然后单击 Calculate 按钮，关闭列表窗口。此时，图形显示如图 3-48 所示。由图可见，机筒内壁面内沿着螺棱处和端面上左侧螺杆外径与右侧螺杆根径的啮合间隙处，均出现了剪切速率的高值区。

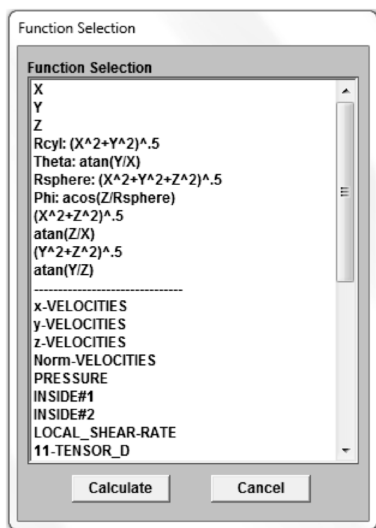


图 3-47　场量列表

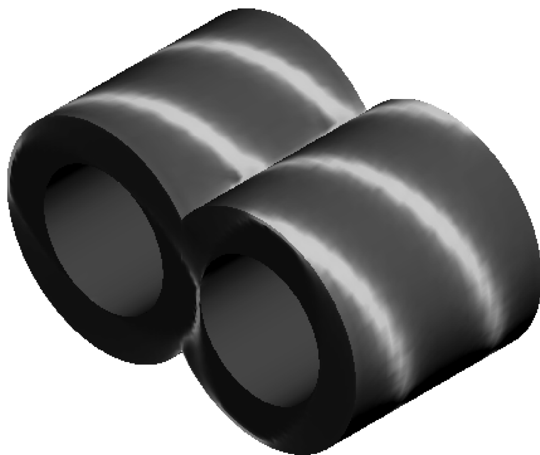


图 3-48　图形窗口显示状态（全部边界的剪切速率）

进入 Legend 子页面（见图 3-49），在该页面中可增加图例，并对其进行设定。勾选 Show Legend 复选框后，FieldView 软件图形窗口右上角则出现图例。保持 LEGEND TYPE 栏中的 Spectrum（色谱类型）选项和 DISPLAY AS 栏中的 Color Bar（颜色条）选项被选中，并将图例中标注数值（Number of Labels）的个数由 2 改写为 6[⊖]。单击其下的向右箭头按钮，将图例放大到合适大小。保持 LABELS 栏的 Color 子栏中默认的 Geom 选项及其后的黑色按

⊖　图例中标注数值的个数需要根据图例大小和字号大小来调整，以最清晰的状态呈现最大量的信息。



钮状态，即确保图例中的文字颜色为黑色。在 Font（字体）栏中保持默认字体。另外，在 LEGEND TEXT 栏中包括两种数值显示方式，即浮点数（Floating Point）和科学计数法（Exponential）。本例中保持默认的浮点数显示方式，且小数点后的位数（Decimal Places）也保持默认值 3。Size 栏可以设定图例中的字号大小，将默认值 10 修改为 12。按住〈Shift〉键的同时，使用鼠标左键将颜色列表拖放到图形窗口的适当位置⊖，此时图形显示窗口状态如图 3-50 所示。

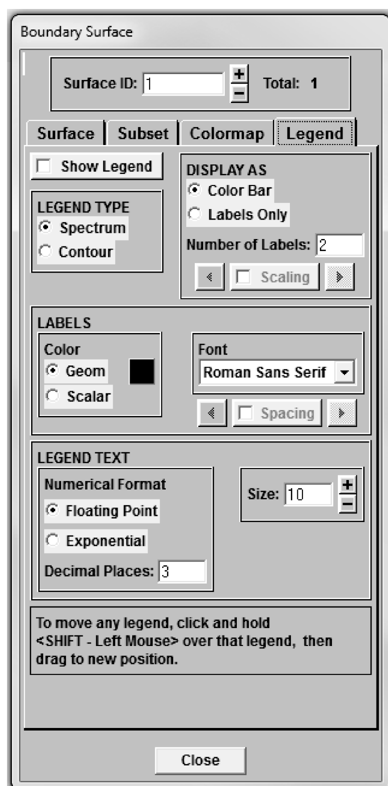


图 3-49　Legend 子页面

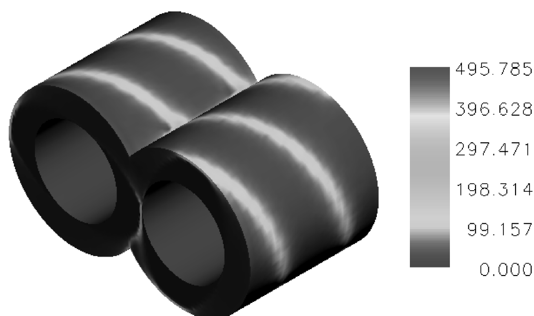


图 3-50　图形窗口显示状态（添加图例）

⊖ FieldView 图形窗口的鼠标使用方法：左键为平移键，右键为缩放键，中间为旋转键，〈Shift + 左键〉可以移动图例。



返回 Surface 子页面（见图 3-45），在 BOUNDARY TYPES 栏中取消选择两个端面和两内孔边界，单击 OK 按钮。此时，图形窗口仅显示机筒内的表面边界。单击工具栏中的视图按钮，在打开的视图设定对话框（见图 3-51）中，单击 + Y（从与 Y 轴正向相反的方向观察）按钮，将视图定向为如图 3-52 所示的方向。随后进入 Colormap 子页面（见图 3-53），勾选 SCALAR COLORING（标量颜色显示范围）栏中 Local 按钮前的复选框。可以发现，在勾选该复选框前后，对比图 3-50 和图 3-52，图例中的数值范围发生了变化，勾选前为整体计算区域中所有 5 个边界内剪切速率的最大值和最小值构成的范围，而勾选后为机筒内表面边界内剪切速率的最大值和最小值构成的范围。

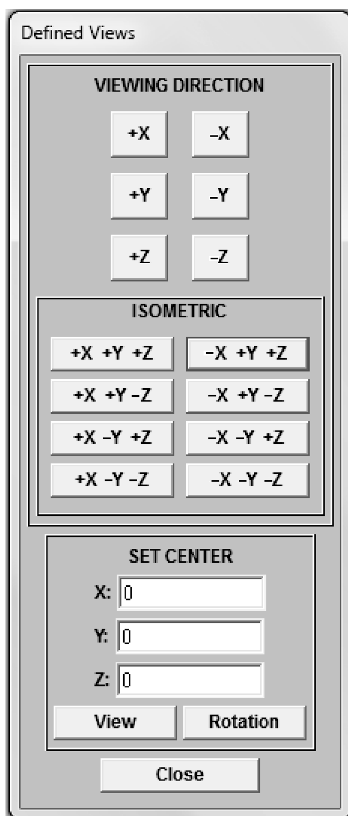


图 3-51　视图设定对话框

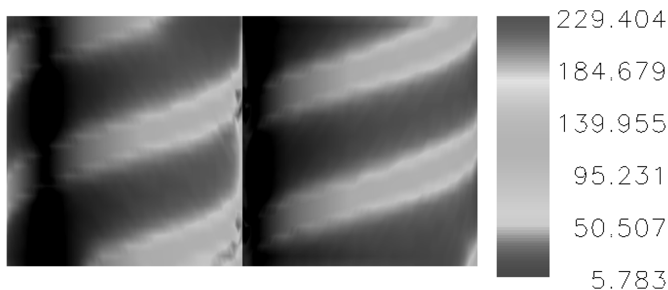
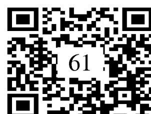


图 3-52　图形窗口显示状态（机筒内表面上的剪切速率分布）



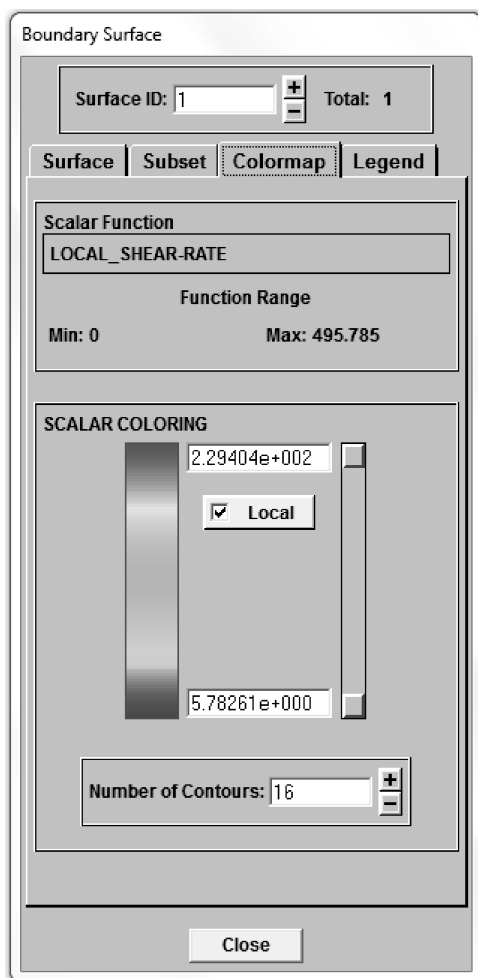


图 3-53 Colormap 子页面

3.3.3 瞬态数据的动态显示

在导入数据阶段，本例导入了 30 个瞬态结果，本节将对瞬态模式下剪切速率的观察进行介绍。保持 Colormap 子页面中 Local 按钮前的复选框为选中状态。单击 FieldView 软件 Tools 下拉菜单中的 Transient Data 选项，打开如图 3-54 所示的 Transient Data Controls（瞬态数据控制）对话框，该对话框中显示总步数为 30 步。该对话框中，还包括时间步数（TIME STEP）与求解时间（SOLUTION TIME）调整栏，可以指定输出特定步数或求解时间点上的结果，可以直接输入数值或拖动进度条来调整，单击 Apply 按钮确认。在 SWEEP CONTROL（扫描控制）栏中，勾选 Sweep 按钮

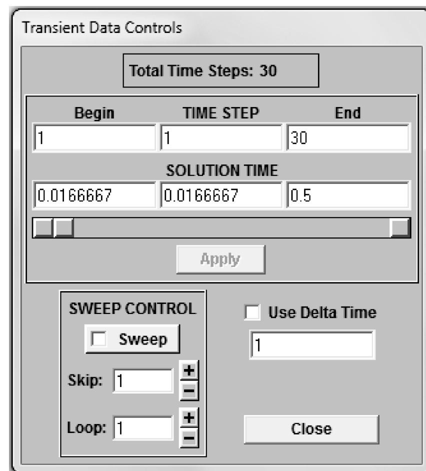


图 3-54 瞬态数据控制对话框



前的复选框，此时图形窗口中的剪切应力分布状态及图例中的数值范围均随螺杆旋转发生变化，这说明螺杆转动到不同位置是流体区域的剪切速率分布状态不同。再次单击 Sweep 按钮，关闭动态显示。

3.3.4　截面上的速度向量分布

返回 Boundary Surface 对话框的 Surface 子页面中，取消选择机筒内壁边界后，选择两个螺杆元件对应的所有边界，单击 OK 按钮。在 COLORING 栏中将显示模式修改为 Geometric 模式，并将其对应的颜色修改为白色。随后，单击视图设定对话框（见图 3-51）中的 +X +Y +Z 按钮。此时，图形显示窗口如图 3-55 所示。

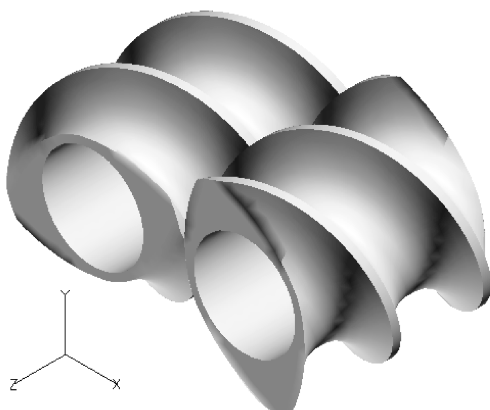


图 3-55　螺杆实体模型

单击工具栏中的坐标面按钮 coord，打开如图 3-56 所示的 Coordinate Surface（坐标面）对话框。与 Boundary Surface 对话框一样，该对话框同样包括四个子页面，分别为 Surface 子页面、Subset 子页面、Colormap 子页面和 Legend 子页面。

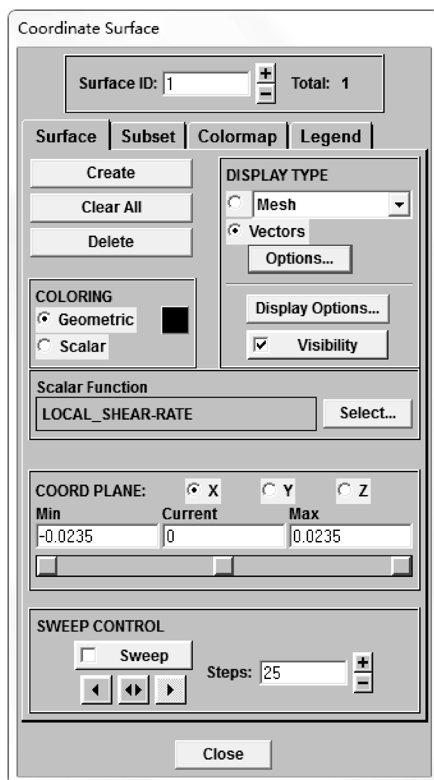


图 3-56　坐标面对话框



本节创建五个与端面平行的截面，以显示不同轴向位置处的速度向量分布。在 Surface 子页面中单击 Create 创建按钮，页面中其他栏均转变为黑色可选状态。在 COORD PLANE 栏中选择 Z 轴选项，创建与 Z 轴垂直的截面。该栏显示状态如图 3-57 所示，其中给出了 Z 轴坐标的最大值和最小值。通过调整当前值（Current）的大小，可以改变截面位置。当前截面对应数值调整为 0m 时，将截面布置在入口位置。选择图 3-56 中 DISPLAY TYPE 栏内的 Vectors 选项后，单击该栏中的 Options 按钮，进入如图 3-58 所示的向量选项对话框。勾选 Head Scaling（向量箭头头部比例）按钮前面的复选框，并可通过 + 和 – 按钮调整头部所占比例，本例保持原数值 1。在 Vector Scale 向量比例栏中通过 + 按钮和 – 按钮调整箭头长度，本例调整到数值 16。单击 Close 按钮，关闭向量选项对话框。

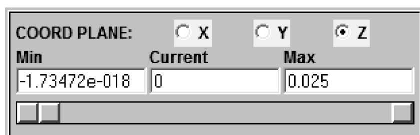


图 3-57　COORD PLANE 栏

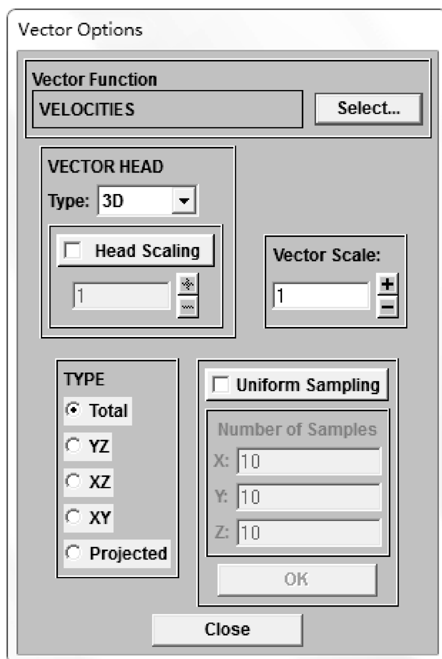


图 3-58　向量选项对话框

在 Surface 子页面（见图 3-56）中，选择 COLORING 栏中的 Scalar 选项，对应的 Scalar Function（标量函数）栏中选择 Norm-VELOCITIES（法向速度）选项。在 Legend 子页面中开启图例，将文字颜色设定为黑色的同时，把数值显示状态修改为科学计数法（Exponential）模式。然后，在 Colormap 子页面中将显示数值范围设定为局部（Local）模式，以显示当前截面上的速度对应的数值。调整后的向量不仅可以清晰地显示箭头方向，而且其上的颜色可以表示速度的大小。调整图像窗口中螺杆及图例的显示位置，显示状态如图 3-59 所示。



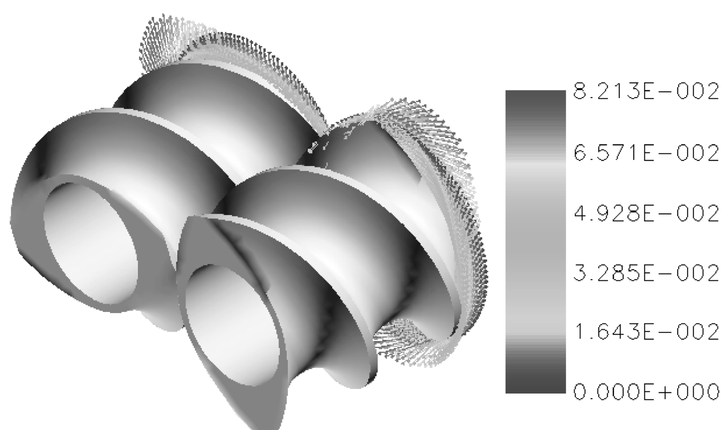


图 3-59　图形显示状态

再次单击 Surface 子页面中的 Create 按钮，创建第二个截面。在如图 3-57 所示的 COORD PLANE 栏中将 Current（当前）设定为 0. 00625m。该截面继承了前一个截面的设定，但需要开启图例。一并完成 0. 0125m、0. 01875m 和 0. 025m 后续三个截面的创建。0. 025m 位置上的截面向量长度比例需要调整为 32。调整后螺杆及图例的显示位置及大小如图 3-60 所示。

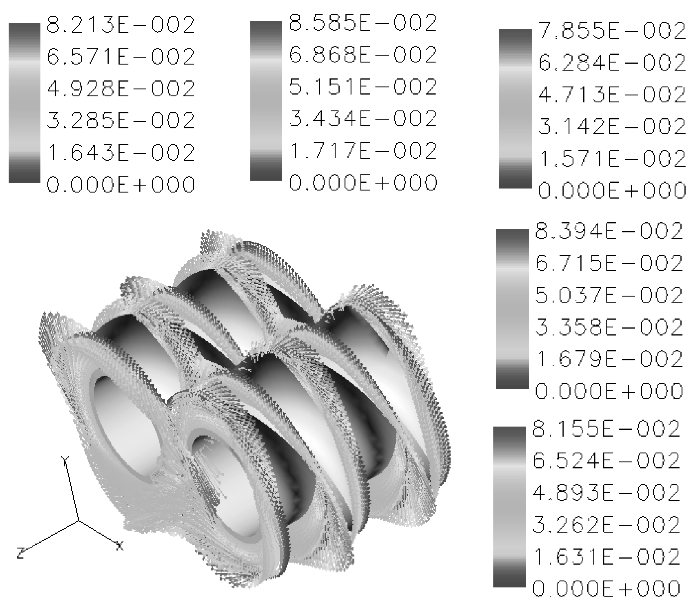


图 3-60　速度向量截面状态显示及图例排布

上左：Z = 0；上中：Z = 0. 00625；上右：Z = 0. 0125；右中：Z = 0. 025；右下：Z = 0. 01875



返回设定后的坐标面对话框（见图3-61），其中Surface ID栏中显示当前共有五个设定层，且第五层为激活状态。通过单击+按钮或–按钮可以调整激活层序号。

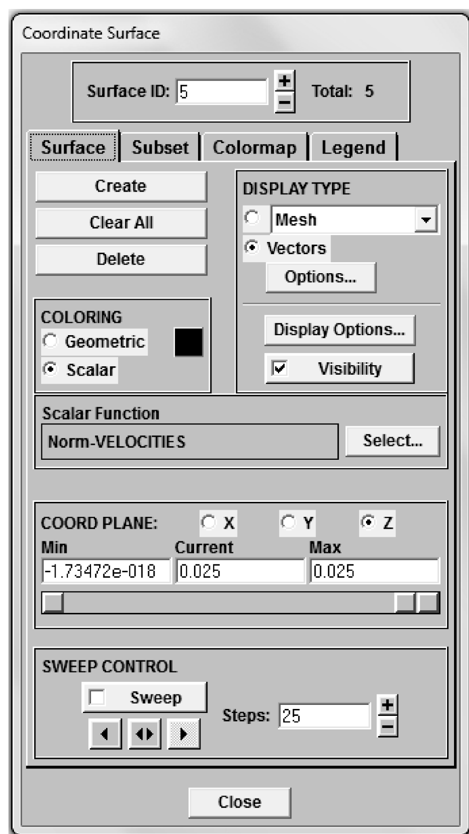


图3-61　设定后的坐标面对话框

3.3.5　挤出方向上的剪切速率变化曲线

在边界表面设定对话框Surface子页面（见图3-61）的DISPLAY TYPE（显示类型）栏中，取消Visibility（显示）按钮的选中状态，将对应层隐藏，图形显示回到图3-55所示的螺杆实体状态。

单击左侧工具栏中的边界按钮 bound，打开如图3-45所示的边界表面设定对话框的Surface子页面，将螺杆表面以Facted形式显示。单击Create创建按钮，创建一个新的显示层。在新的层中，将流体区域入口和出口表面以黑色（mesh）形式显示，如图3-62所示。

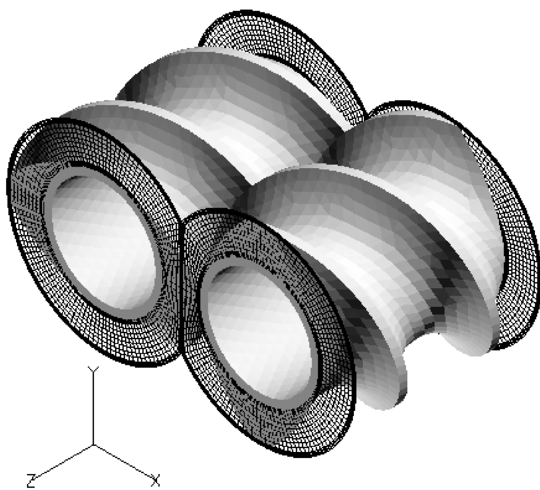


图3-62　入口、出口网格显示模式



单击视图按钮，打开如图 3-51 所示的视图设定对话框，单击 +Z 按钮，将图片放置成如图 3-63 所示的端面正式模式。

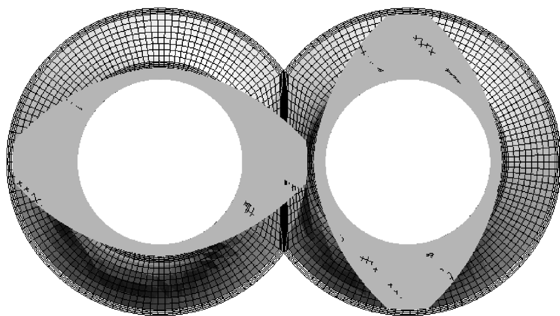


图 3-63　端面正式模式

单击工具栏中的绘图工具按钮，打开如图 3-64 所示的 2D Plot Controls（二维绘图控制）对话框。单击 Create 按钮，打开如图 3-65 所示的 Create Path（创建路径）对话框⊖。单击 Line Plot 按钮，打开如图 3-66 所示的 Edit Points（编辑点）对话框。通过编辑路径直线的两个端点来构造路径。可以直接输入坐标数值，也可以使用〈Ctrl + 鼠标左键〉的选取方式，在图形窗口中点选。点选后，点 1 和点 2 的数值将出现在 Point1 和 Point2 对应位置。还可以进一步对该数值进行编辑。点选和编辑两个点的坐标后，单击 Calculate（计算）按钮后，勾选图 3-64 中的 Show Path（显示路径）按钮前面的复选框。图形窗口中显示路径的同时（见图 3-67），在图 3-68 所示的图形窗口中显示了在机筒螺杆间隙内沿着挤出方向的剪切速率分布。

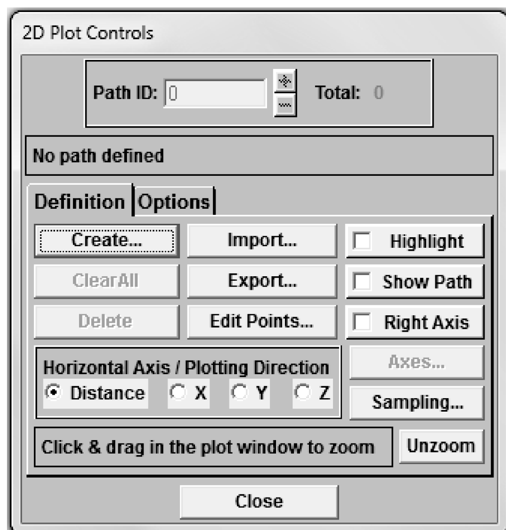


图 3-64　二维绘图控制对话框

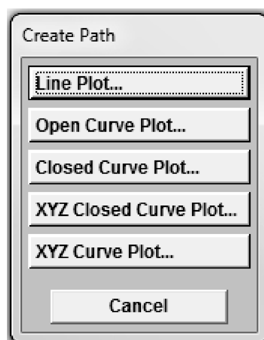


图 3-65　创建路径对话框

⊖　这里所绘制曲线描述了场值沿着创建路径长度的变化。



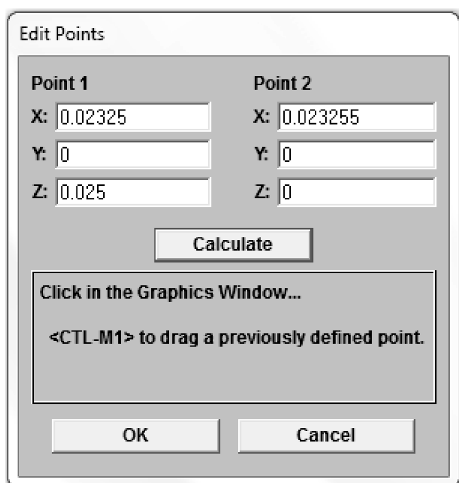


图 3-66　编辑点对话框（设定后的状态）

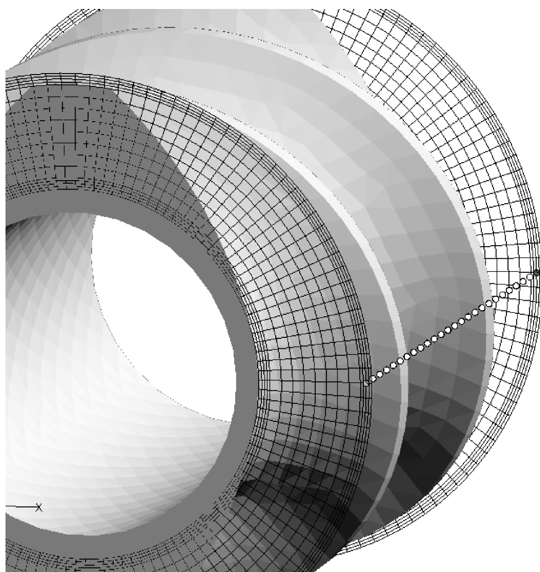


图 3-67　图形窗口中显示的路径

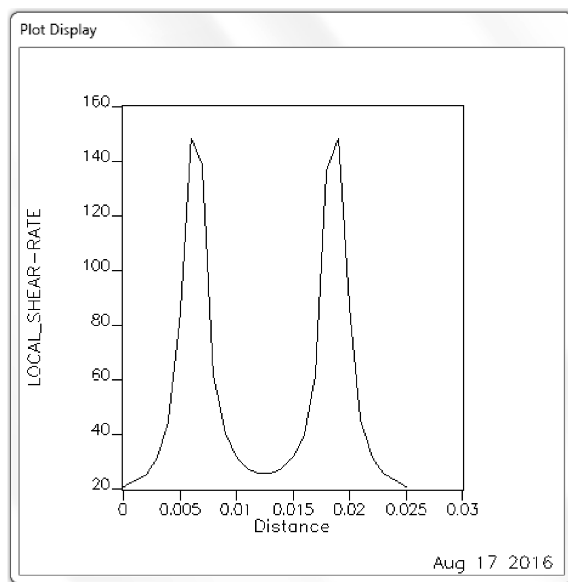


图 3-68　机筒螺杆间隙内沿着挤出方向的剪切速率分布

单击 File 下拉菜单中的 save restart 选项，在其子菜单中单击 Complete 命令，在打开的 Save restart 对话框中完成命名及存放位置的设定，然后单击 Save 按钮。这样，下次可以通过打开该文件重新启动到当前设定状态。

3.4　在瞬态任务的基础上完成稳态任务的设定

对于具有一定相似性的流场任务来说，如果能够在现有 dat 文件上设定新的仿真任务，



则可以大大简化设定流程。本节将讲述如何在双螺杆瞬态流场任务（3.2 节）dat 文件的基础上获得稳态流场任务 dat 文件的过程。

在 Polyman 窗口中建立名为 TSE_time_indep_iso 的仿真任务，并将瞬态任务使用的 msh 文件和生产的 dat 文件复制到对应位置，文件树如图 3-69 所示。双击 msh 或 dat 文件，进入 Polydata 设定页面进行设定。

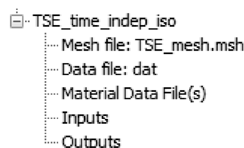


图 3-69　文件树

在图 3-70 所示的 Polydata 设定页面中，单击 Redefine global parameters of a task（重新定义任务整体参数）选项，进入如图 3-71 所示的任务整体参数设定页面。将 Time-dependent problem（s）（瞬态问题）选项修改为 Steady-state problem（s）（稳态问题）选项[⊖]。设定后单击 Accept the current setup（接受当前设定）选项接受设定。退出 Polydata，完成由瞬态任务到稳态任务的修改。

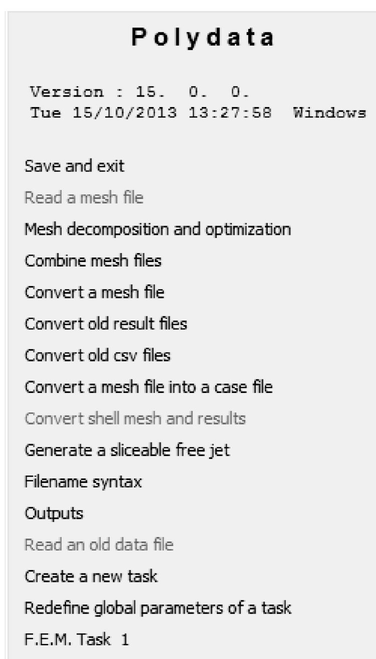


图 3-70　Polydata 设定页面中

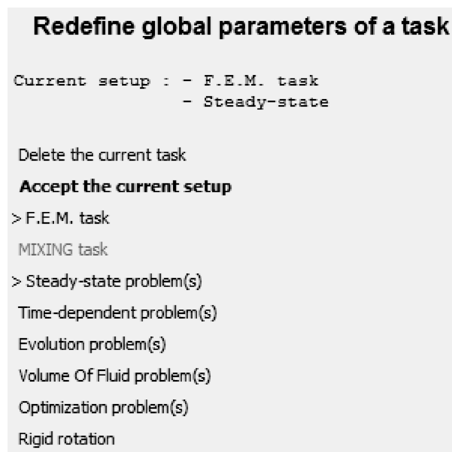


图 3-71　任务整体参数设定页面

3.5　网格重叠技术

3.5.1　网格重叠技术简介

以双螺杆挤出仿真为例，使用传统方法在建模过程中需要使用布尔运算，将流体区域几何体与螺杆元件几何体相减，以获取实际流体模型。为了分析螺杆不同相位处的流场特征，

⊖ 系统会自动将原瞬态问题中与时间有关的因素关闭，且保持计算区域、物性、边界条件、插值关系、运动部件及其运动参数以及输出类型不变。



需要建立多个几何模型。Polyflow 软件使用网格重叠技术可以有效地简化网格划分环节的复杂程度[⊖]。特别是对于像双螺杆挤出这样复杂的几何模型来说，网格重叠技术的作用更加明显，只需建立流体区域模型和螺杆模型。对每个模型进行网格划分后，可将流体区域和螺杆元件进行组装，并根据运动算法控制螺杆位置，即可构建出用于瞬态计算的网格文件。但是值得注意的是，网格重叠技术会造成计算误差，这是因为使用网格重叠技术后无法获得清晰的螺杆边界轮廓。也正是因为这个原因，计算中也无法保持流体的质量守恒特性，容易形成压力峰值或出现漏流现象。

3.5.2　推荐的插值关系

对于使用网格重叠技术进行流场计算的问题来说，建议使用以下内容作为默认的插值关系：

1）对于 2D 问题采用二次速度单元，对于 3D 问题采用 mini 速度单元。

2）对于 2D 和 3D 问题，单元内压力均为常数。

3）对于 2D 问题采用二次温度单元，对于 3D 问题采用线性温度单元。

3.5.3　运动部件复杂运动模式的检查

对于复杂的运动来说，可以利用如下的方式运行 Polyflow 以检测运动的正确性：

```
polyflow-motion  <  myfile. dat
```

使用该方式只计算运动部件位置，而不计算流场，这样可以减少测试运动的时间。

3.5.4　注意事项

在使用网格重叠技术求解带有运动部件的流场问题时，要注意以下几点：

1）流体区域和运动部件网格大小应基本相同。

2）对局部细节区域网格要进行细化，否则粗糙的网格将造成某些重要细节被忽略。例如，螺杆和机筒之间的间隙，在间隙厚度方向要包括四到五层网格（见图 3-72），否则将无法详细地描述机筒与螺棱之间间隙内的流动。第 2 章中提及的边界层绘制方法可有效解决这一问题。

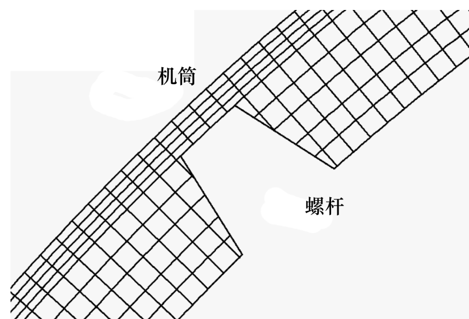
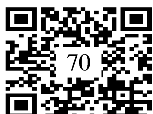


图 3-72　机筒与螺杆之间间隙内的网格

⊖ 目前，网格重叠技术只能在 2D 平面或 3D 的广义牛顿流体流动问题中使用。



3）一直被运动部件覆盖的流体区域可以去除。按照图 3-73 所示的情况来建立几何模型，将使得网格数量减少的同时，减少计算消耗的内存和时间。

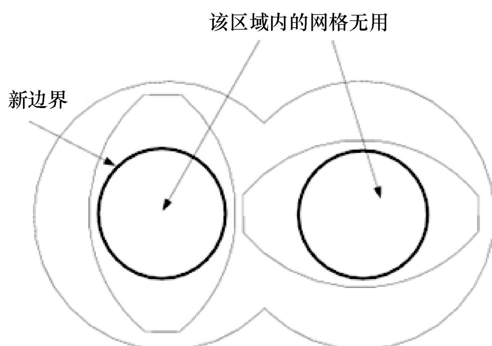


图 3-73　几何模型

4）如果内部边界被运动部件重叠，则需要确保边界与运动部件的运动相匹配。某些边界条件容易造成与旋转螺杆之间的不匹配，特别是当一个螺杆旋转且与流体区域的入口和出口边界相重叠的时候，如果入口和出口分别给定 inflow 和 outflow 条件，就会出现不匹配的情况，因为这两个边界条件中指定切向速度为零。遇到这个情况，有两个解决途径：一种是延长流体段长度，在入口和出口均空出一段流体区域不与螺杆重叠，如图 3-74 所示；另一种是在这两个边界上施加 fn = fs = 0 的边界条件。

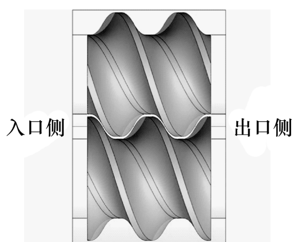


图 3-74　延长流体区域

5）确保运动部件的运动方向正确。对于瞬态任务来说，最好先通过稳态任务流场结果检查运动部件的运动方向是否正确。

6）要合理地设定瞬态问题的仿真时间上限和时间步长。时间步长过小将造成计算时间的增加。以双螺杆挤出仿真任务为例，仿真时间上限要设定为能够让螺杆回到其初始位置的时间。对于双头对称的双螺杆元件来说，计算时间应该为螺杆旋转半圈所用的时间。同时，在计算中时间步长要保持为常数。总的计算步数 N 与时间步长 dt 及仿真时间 t_f 之间的关系为



$$N = \frac{t_f}{dt} \tag{3-9}$$

7）三维问题中，推荐使用 mini-element 类型速度单元 + 单元内压力为常数的插值关系。这样的插值关系比线性速度单元 + 单元内压力为常数的插值关系更适合于求解，但是所需的计算时间更长、内存更高。

3.6 系列化流场计算问题的设定参数管理

系列化流场计算问题中设定参数管理是进行系列化流场计算所要考虑的问题。本节以转速 60r/min、90r/min 和 120r/min 的系列化模拟为例，讲述使用模拟参数表进行模拟参数管理的方法。

3.6.1 构建模拟参数表格

双击 TSE_01_time_depd_isothermal 模拟任务，进入其 Polydata 设定页面。在查阅 dat 文件中设定，将与转速 60r/min 有关的参数列于表 3-1 中，并在此基础上把 90r/min 和 120r/min任务的相应数据列入表 3-1 中。

表 3-1　有关速度的相关参数

序号	变 量 名 称	60r/min	90r/min	120r/min
1	Angular velocity（S1）	-60	-90	-120
2	Angular velocity（S2）	-60	-90	-120
3	Upper time limit	0. 5	0. 3333333	0. 25
4	Initial value of the time step	0. 0166667	0. 011111111	0. 00833333
5	Min value of the time step	0. 000166667	0. 000111111	0. 00008333
6	Max value of the time step	0. 0166667	0. 011111111	0. 00833333
7	Output at exact t values	0. 0166667	0. 011111111	0. 00833333

3.6.2 构建新建仿真任务的数据列表

新建 90r/min 和 120r/min 的仿真任务，并将螺杆转速为 60r/min 任务的 msh 文件和 dat 文件复制到对应位置。双击 dat 文件启动 Polydata，在运动部件的运动参数设定中修改转动速度，在数值参数部分修改瞬态任务参数，在结果输出中指定相应的时间步长。具体修改参数详见表 3-1。

3.6.3 结果对比

1. 转速对剪切速率分布的影响

图 3-75 给出了不同转速下机筒内壁面处剪切速率的分布状态。从图中剪切速率的分布来看，转速提高对分布趋势没有明显影响，但是剪切速率的数值增加。



纹元件的输送能力呈线性增加。

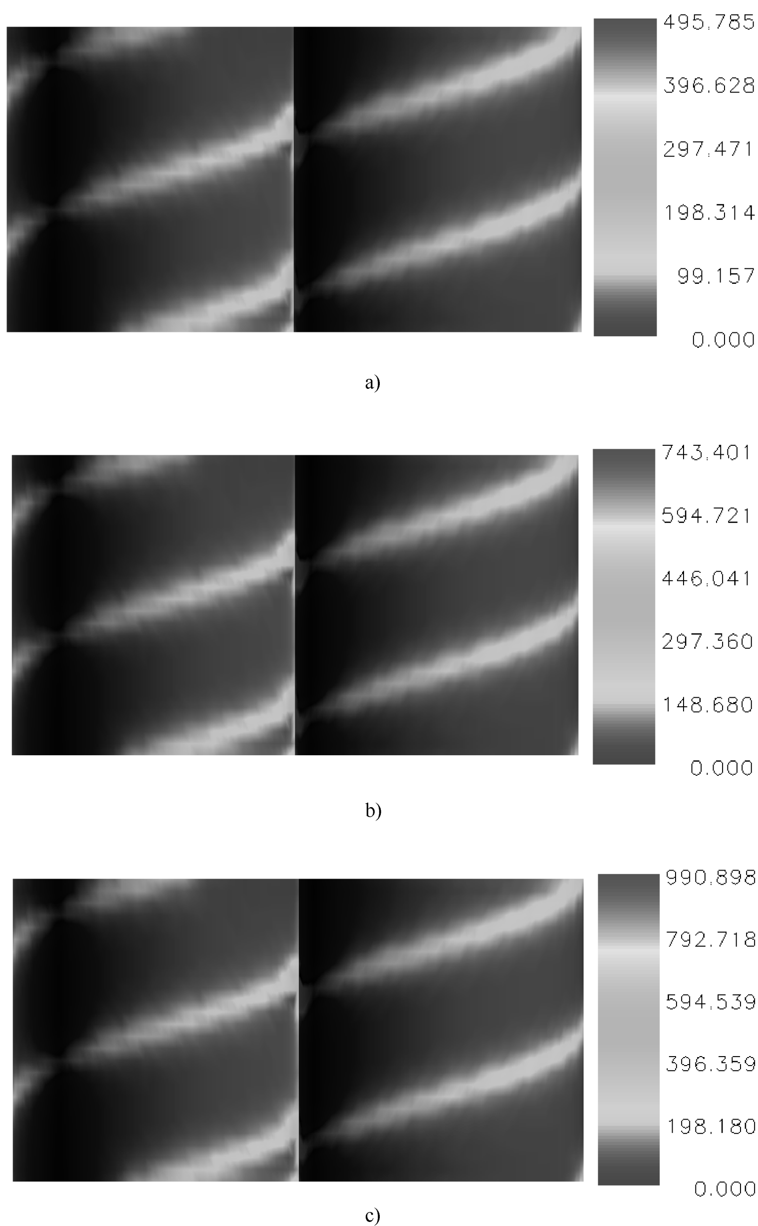


图 3-75　不同转速下机筒内壁面处剪切速率的分布状态

a）60r/min　b）90r/min　c）120r/min

2. 转速对输送体积流率的影响

从 Polyflow 计算文件中的 listing 文件里获得提取出口截面上的体积流率，并取平均值，以分析转速对输送体积流率的影响（见图 3-76）。在出口敞开（fn = 0）时，转速提高，螺纹元件的输送能力呈线性增加。



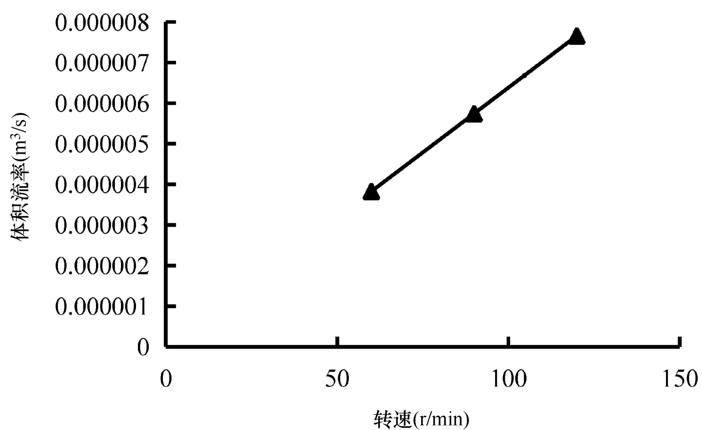


图 3-76　转速对出口流率的影响

思　考　题

1. 完成转速 90r/min 和 120r/min 两个仿真任务，绘制不同转速下挤出方向上的剪切速率变化曲线。

2. 使用两种流体网格，完成啮合盘元件的流场模拟，对比轴向间隙中的剪切速率分布。



第 4 章 双螺杆挤出混合性能的统计分析

第 3 章计算得到了 30 个连续的瞬态结果文件，本章在此基础上采用示踪粒子轨迹跟踪技术，计算初始布置在流体区域入口的 2000 个示踪粒子在双螺杆输送元件内的运动轨迹。并在此基础上，利用 Polystat 模块对示踪粒子沿轨迹的流场参数进行统计分析，建立流场混合性能评价指标体系。

4.1 混合任务的设定

4.1.1 仿真任务的创建

在 Polyman 窗口中单击新建仿真任务 S 按钮，建立名为 TSE_mixing 的仿真任务，并将第 3 章计算中用到的网格文件复制到该仿真任务 msh 文件的对应位置，文件树如图 4-1 所示。双击 msh 文件，启动 Polydata 程序，开始混合任务的设定。

在如图 4-2 所示的 Polydata 设定页面中，单击 Create a new task（创建新任务）选项，进入如图 4-3 所示的 Create a new task（创建新任务）页面，在该页面中可以设定任务的类型。为了进行混合任务，选择其中的 MIXING task（混合任务）选项。鉴于第 3 章中计算流场任务是与时间有关的，故本节中均选择 Time-dependent problem(s)（与时间有关的问题）选项。设定后，单击 Accept the current setup（接受当前设定）选项，进入 MIXING Task 1（混合任务 1）设定页面（见图 4-4）。

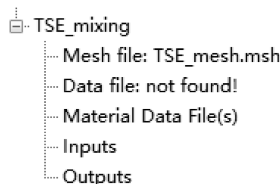


图 4-1　文件树

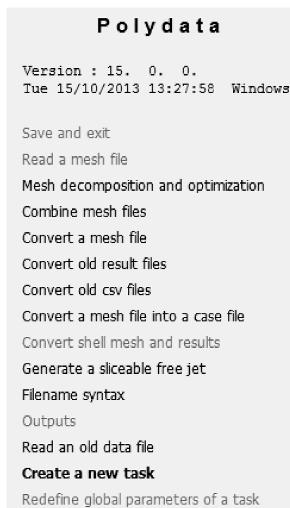


图 4-2　Polydata 设定页面



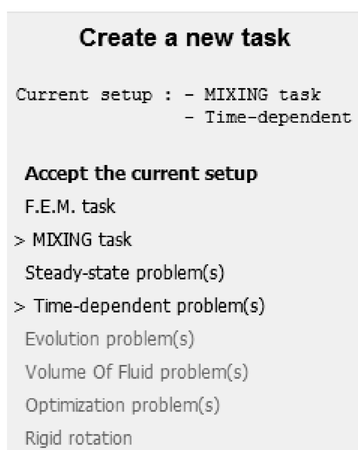


图 4-3　创建新任务页面（设定后的状态）

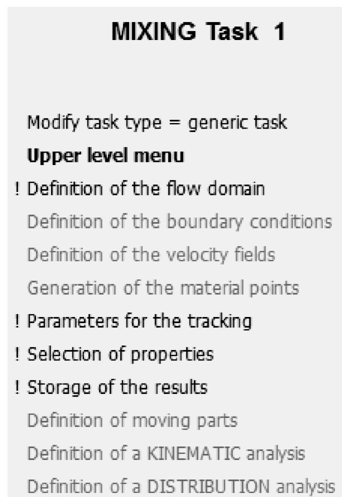


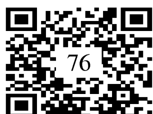
图 4-4　混合任务 1 设定页面

4.1.2　计算区域的设定

单击图 4-4 中的! Definition of the flow domain（定义流动区域）选项，进入如图 4-5 所示的 Flow domain（流体区域）设定页面。在该页面中，系统默认包括运动部件在内的所有区域均为选定状态。需要通过移除 Romove 的方式将两个运动部件区域放置到待选区。在区域列表中，Add sdom re2 和 Add sdom re3 为运动部件区域。设定完成后单击 Upper level menu 按钮返回混合任务 1 设定页面（见图 4-4）。



图 4-5　流体区域设定页面（设定后的状态）



4.1.3　边界条件的设定

图 4-4 中原本为灰色的 Definition of the boundary conditions（定义边界条件）选项已经变为黑色可选状态。单击该选项后，进入如图 4-6 所示的 Boundary conditions（边界条件）设定页面。为了区分流体区域的入口和出口边界，需单击 Polydata 窗口内 Graphical window 下拉菜单中 Axes 子菜单的 show axes 选项，打开坐标轴。根据坐标轴中 Z 轴的方向来区分出口和入口边界（见图 4-7）。在图 4-6 所示的边界条件列表中，选中入口边界（名为 ement_side. 1），单击 Modify 按钮，进入入口边界设定页面（见图 4-8）。选择 Inflow 选项，然后单击 Upper level menu 按钮，返回如图 4-6 所示的边界条件设定页面。对出口（名为 ement_side. 2）进行边界设定，进入如图 4-9 所示的出口边界设定页面，选择 Outflow 选项。保持两个内孔及机筒内壁边界为默认的 non-penetrable（不可穿透）边界条件。设定后单击 Upper level menu 按钮，返回混合任务 1 设定页面（见图 4-4）。

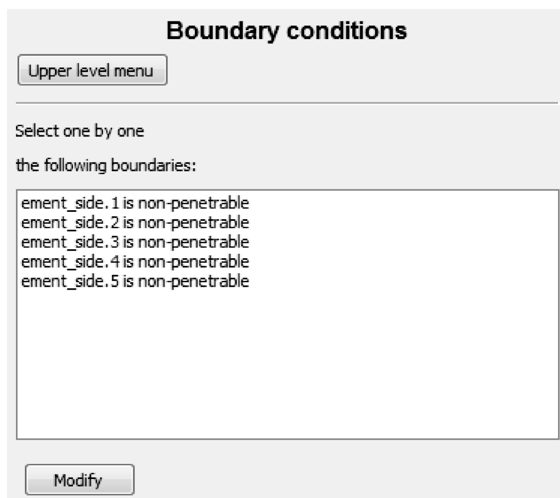


图 4-6　边界条件设定页面

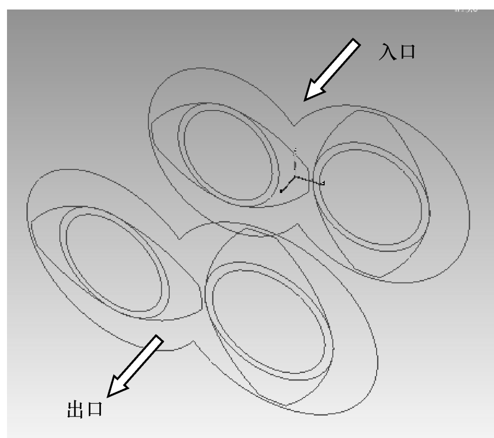


图 4-7　开启坐标轴后的图形窗口



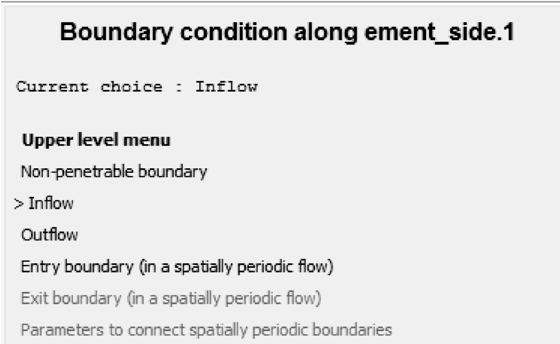


图 4-8　入口边界设定页面（设定后的状态）

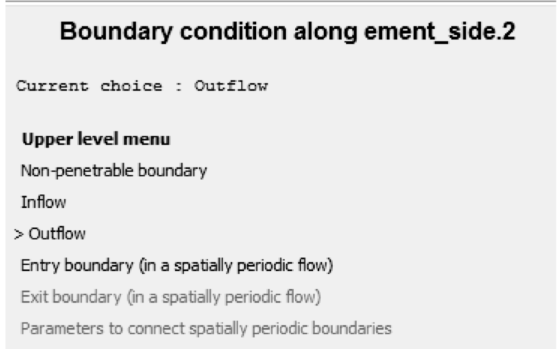


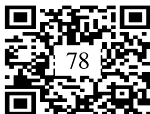
图 4-9　出口边界设定页面（设定后的状态）

4.1.4　流场的定义

单击图 4-4 中的 Definition of the velocity fields（速度场设定）选项，进入如图 4-10 所示的 Flow definition（流场设定）页面。第 3 章中的流场计算任务为瞬态任务，所以需要保持默认的 Continuous transient flow（连续瞬态流动）选项和 Automatic selection of result files（系统自动选择流场结果）选项。表 4-1 中给出了图 4-10 中所包括的各个参数的含义及设定数值。其中，时间步长要与瞬态流场计算结果输出时设定的时间步长相对应。单击 Modify the prefix of the result files（编辑结果文件前缀名）选项后，在流场结果存放目录中找到 Polyflow 类型的结果[1]。在流场计算获得的瞬态流场结果中，编号为 1 的流场结果中螺杆已经旋转了一定角度[2]，按照流场相关设定，第 30 个结果中螺杆正好转了 180°，回到了初始网格位置。所以，在指定第一个流场结果编号时要选择运动部件正好处于初始位置的第 30 个结果文件。本页面中的 Switch to binary（unformatted）result files 选项与已经选中的 Switch to ascii（formatted）result files 选项为相互切换的选项。系统默认以 ASCII 码的形式输出结果。两种类型结

[1] 在流场任务计算后，Polyflow 类型文件的文件名为 res_2. i，其中 res_2 为前缀名；i 为其后缀名，即结果序号。

[2] 根据第 3 章瞬态流场计算任务的瞬态参数设定，res_2. 1 结果文件中两螺杆相对初始位置已转过 6°。res_2. 30 流场结果文件中，螺杆的转动角度为 180°，由于该元件双头结构的对称性，且计算中忽略惯性的影响，因此可以认为 res_2. 30 文件中的流场状态与初始螺杆位置的流场状态一致。



果所需的存储空间不同。设定后单击 Upper level menu 按钮，返回混合任务 1 设定页面。

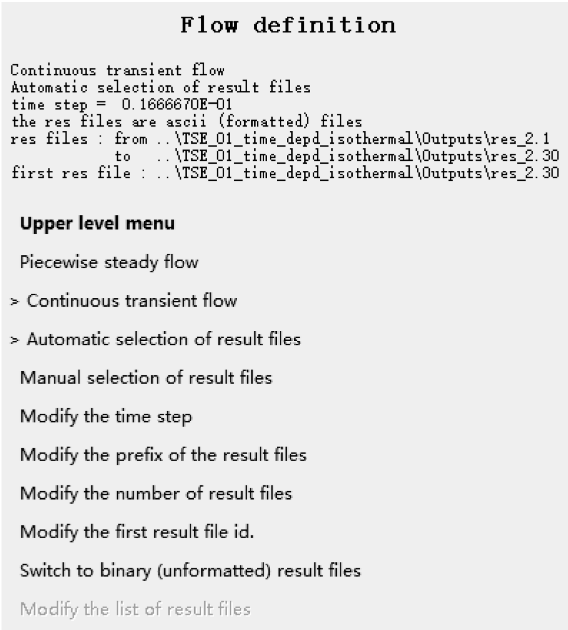


图 4-10　流场设定页面（设定后的状态）

表 4-1　流场设定相关参数

选　　项	定　　义	数　　值
Modify the time step	时间步长	0.0166667
Modify the prefix of the result files	结果文件前缀名	res_2
Modify the number of result files	结果数量	30
Modify the first result file id.	第一个结果文件的序号	30

4.1.5　示踪粒子的生成

单击图 4-4 中的 Generation of the material points（生成示踪粒子）选项，进入如图 4-11 所示的示踪粒子点生成设定页面。单击其中的！Add a new generation zone（添加示踪粒子生成区域）选项，进入如图 4-12 所示的 Generation Zone 1（示踪粒子区域 1）设定页面。其中粒子生成区域的默认选项为 This zone is all the flow domain（整个流体区域）。根据需要，针对具有入口和出口的流体流动问题，通常将示踪粒子放置在一个框选区域或区域入口中[1]。本例中，将粒子放置在区域入口，所以单击 This zone is all the inflows of the flow domain（本区域为流体区域的所有入口）选项[2]，设定后单击 Upper level menu 按钮，返回混合任务 1 设定页面。

[1] 示踪粒子的生产区域可以是流体区域的某一边界，也可能是流体区域与设定立方体区域的相交部分。

[2] 由于只有一个 inflow 入口边界，所以本例选择 This zone is all the inflows of the flow domain 选项，与选择 This zone is one inflow of the flow domain（本区域是流体区域的入口之一）选项的效果是一样的。



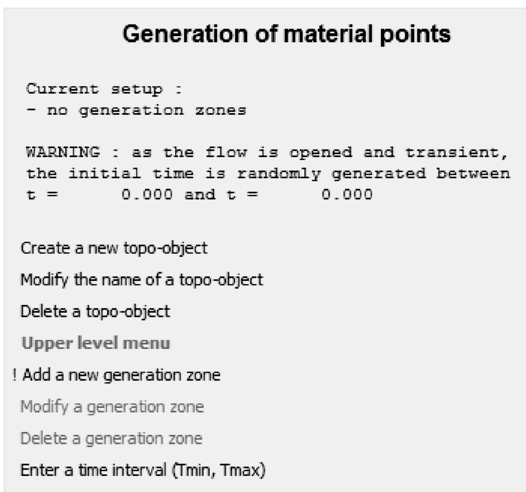


图 4-11　示踪粒子点生成设定页面

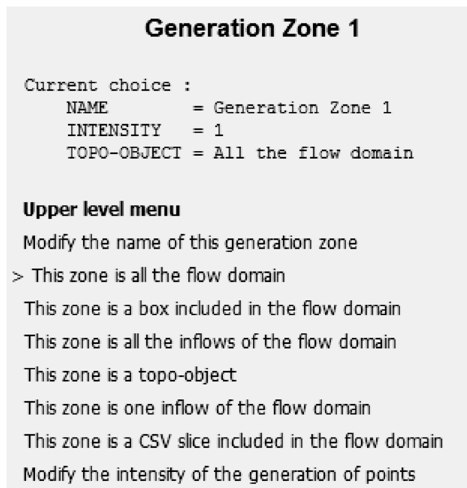


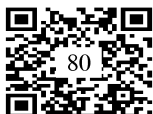
图 4-12　示踪粒子区域 1 设定页面

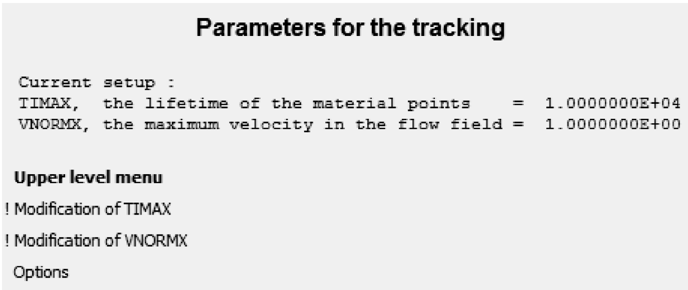
4.1.6　粒子轨迹跟踪参数设定

单击图 4-4 中的 Parameters for the tracking（轨迹跟踪参数）选项，进入如图 4-13 所示的 Parameters for the tracking（轨迹跟踪参数）设定页面。其中，TIMAX 参数定义示踪粒子在混合过程中的存在时间，这个数值根据混合的实际情况进行设定，对于有入口和出口的混合任务来说，TIMAX 参数的设定要保证粒子能够有足够的时间从出口离开。VNORMX 参数定义流场中的最大速度，可以利用后处理软件从流场结果中获取该数值。这个数值不一定要特别精确，保证相同数量级即可。单击 Options 选项，进入轨迹跟踪参数选项的子页面（见图 4-14），其中包括四个参数：NBELEM 定义为在每个单元内计算示踪粒子轨迹时的积分次数，系统默认参数为 3[㊀]。EPSPNT 是距离误差。如果两个点的距离小于 EPSPNT 的值，则认为轨迹上的两个点是同一个点。EPSVIT 是速度误差，它用于判断示踪粒子是否为滞留点：如果局部速度低于 EPSVIT 与 VNORMX 的乘积，那么示踪粒子在 t 时刻就是一个滞留点。EPSTIM 是时间步长误差，当时间步长小于 EPSTIM 时，就认为其为 0；EPSTIM 参数是牛顿-拉尔森程序迭代的终止条件，用于找到示踪粒子到达当前有限单元边界所需的时间步长[㊁]。保持图 4-14 中的各参数为默认值，且在图 4-13 中设定 TIMAX 为 60s、VNORMX 为 0.1m/s。设定后单击 Upper level menu 按钮，返回混合任务 1 设定页面。

㊀ 理论上讲，这个参数对获取精确的计算轨迹有重要作用，但根据 Polyflow 帮助文件介绍，NBELEM 参数大于 3 没有意义，因为 NBELEM =3 时就已经达到了积分算法的固有精度，并且该参数数值越高，消耗的计算时间越长。

㊁ 示踪粒子轨迹是通过在单元内对速度进行积分获得的。从流入流体区域开始，直到示踪粒子离开流体区域或到达 TIMAX 参数规定的示踪粒子存在时间，整个过程中，粒子从一个单元流入另外一个单元。贯穿单元边界对应的时间是轨迹生成的重要参数。图 4-15 给出了计算过程中示踪粒子轨迹与单元边界相交的示意图。





Parameters for the tracking

```
Current setup :
TIMAX,  the lifetime of the material points    =  1.0000000E+04
VNORMX, the maximum velocity in the flow field =  1.0000000E+00
```

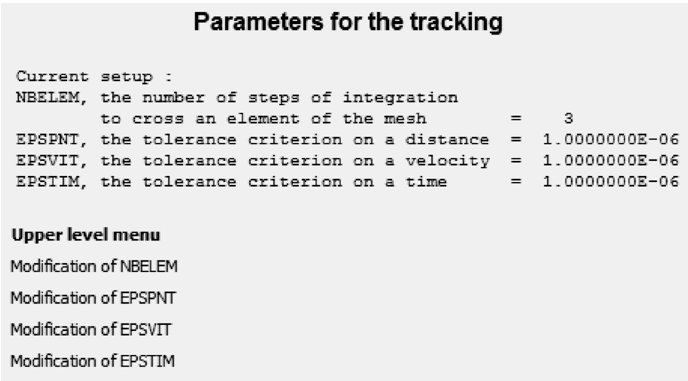
Upper level menu

! Modification of TIMAX

! Modification of VNORMX

Options

图 4-13　轨迹跟踪参数设定页面



Parameters for the tracking

```
Current setup :
NBELEM, the number of steps of integration
        to cross an element of the mesh        =    3
EPSPNT, the tolerance criterion on a distance  =  1.0000000E-06
EPSVIT, the tolerance criterion on a velocity  =  1.0000000E-06
EPSTIM, the tolerance criterion on a time      =  1.0000000E-06
```

Upper level menu

Modification of NBELEM

Modification of EPSPNT

Modification of EPSVIT

Modification of EPSTIM

图 4-14　轨迹跟踪参数选项的子页面

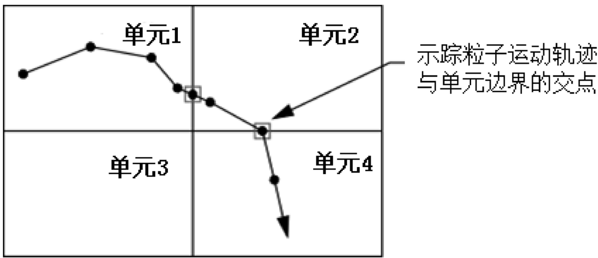


图 4-15　示踪粒子轨迹计算示意图

4.1.7　存储属性的选择

单击图 4-4 中的 Selection of properties（属性选择）选项，进入如图 4-16 所示的属性选择设定页面。在这个页面中可以选择在第 3 章流场计算结果中已经包含的场值属性。这些参数中，时间 Time 和坐标 Coordinates 是默认选择的，如果运动轨迹不包括这两个信息，那也就失去了意义。各属性的含义介绍如下。

1. 空间距离积分

基于速度 $v(t)$ 对时间的积分可以计算示踪粒子运行的距离 $S(t)$：

$$S(t) = \int_0^t v(t)\,\mathrm{d}t \tag{4-1}$$



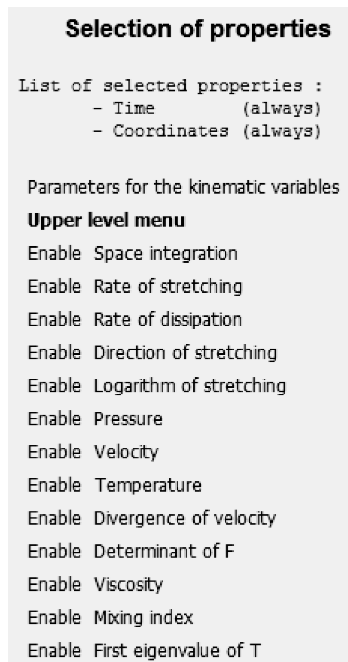


图 4-16 属性选择设定页面（设定后的状态）

2. 动力学参数

动力学参数主要包括 Rate of stretching（拉伸速率）、Rate of dissipation（耗散速率）、Direction of stretching（拉伸方向）和 Logarithm of stretching（拉伸的自然对数）。

3. 流场特征参数

流场特征参数主要包括 Pressure（压力）、Velocity（速度）和 Temperature（温度）。

4. 计算精度评价指标

计算精度评价指标主要包括 Divergence of velocity（速度偏差）和 Determinant of F（张量 F 的行列式）。

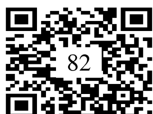
5. 流场中存储的其他参数

主要包括 Viscosity（黏度）、Mixing index（混合指数）和 First eigenvalue of T（张量 T 的第一特征量），这三个参数对评价分散混合至关重要。物料黏度与经历的剪切速率相关。混合指数 M 是描述流场流动形式的指标，$M=0$ 则表示平推流，$M=0.5$ 为剪切流动，$M=1$ 为拉伸流动。张量 T 表示第一特征量为局部应力大小，对评价毛细管数（Capillary 数）有重要作用。

本章下一节中将统计示踪粒子在双螺杆输送元件内的停留时间分布、分布指数、分离尺度、最大剪切应力分布以及少组分粒径变化等特征指标，所以要选择 Rate of dissipation（耗散速率）和 Viscosity（黏度）两个选项。设定后单击 Upper level menu 按钮，返回混合任务 1 设定页面。

4.1.8 结果的存储

单击图 4-4 中的 Storage of the results 选项，进入如图 4-17 所示的 Storage of the results



（结果存储）页面，其中各个选项的定义介绍如下。

Storage of the results

```
Generation of a single result file
named [mixing.mix]
This file is formatted (ascii)
The max. number of trajectories = 100 per file
The max. CPU time = 4 hours per file
We store the successive positions of the material points
at each time step of  1.0000000E+00 seconds
```

Upper level menu

Modify the prefix of result files = mixing
Modify the number of result files = 1
Modify the format of result files = ascii (formatted)
Modify the max. number of trajectories = 100 per file
Modify the max. CPU time = 4 hours per file
Storage of all the points of the trajectories
> Storage at each time step (exactly)
Storage after each time step (minimum)
Storage at each displacement (exactly)
Storage after each displacement (minimum)
! Modify the time step = 1.0000000E+00

图 4-17　结果存储页面

1. Modify the prefix of result files 选项

通过该选项可以指定混合任务存储结果的文件名前缀。本例保持默认设定。

2. Modify the number of result files 选项

通过该选项可以指定输出结果的个数。如果结果个数大于 1，则在初始结果中将以 mixing_id. mix 的形式输出结果，其中 id 是结果的序号。笔者习惯将结果个数设定为 1。

3. Modify the format of result files 选项

通过该选项可以指定结果的输出类型。结果输出类型要与 4. 2. 2 节读取混合任务结果文件中的相关设定相匹配。

4. Modify the max. number of trajectories 选项

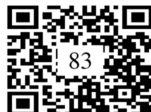
通过该选项可以指定每个结果中包括的轨迹条数，该参数与 number of result（结果个数）参数相乘，就是总轨迹数。本例设定为 2000，即总轨迹函数为 $1 \times 2000 = 2000$ 条。

5. Modify the max. CPU time 选项

通过该选项可指定每个结果计算所允许的最大计算时间。当数值为 4 时，表示每计算一个结果文件，最多允许时间为 4h。如果时间超过 4h，则停止计算。当一个文件包含较多轨迹时，应适当提高该参数。本例设定为 10h。

6. 轨迹存储方式

Polydata 提供了五种轨迹存储方式：每步计算都进行结果存储、在每个精确的时间步长上进行结果存储、每隔最小时间步长后存储结果、在每个精确的位移上进行结果存储和在每隔最小位移上进行结果存储。根据五种不同的方式，图 4-17 中最后一行的选项会发生变化，用来给定时间步长参数或位移步长参数。本例选择第四种方式，且位移步长参数设定为 0. 001m。



4.1.9 运动部件的定义

本节定义与流体区域重叠的运动部件。经定义后，如果在4.1.5节定义的示踪粒子生成区域与运动部件有重叠的部分，则在生成示踪粒子时将避开重叠部分区域[⊖]。

在图4-4中单击Definition of moving parts（定义运动部件）选项，在打开的如图4-18所示的运动部件定义页面中，单击! Creation of a new moving part（创建新运动部件）选项，进入如图4-19所示的moving part #1（运动部件#1）设定页面。单击Definition of the moving part domain（运动部件区域）设定选项，在如图4-20所示的运动部件区域选择页面中选定运动部件的区域。图4-19中还包括修改运动部件名称的Modification of title选项。

本例包括两个运动部件，在完成第一个运动部件设定的基础上，还要进行另一个运动部件的设定。此时，运动部件定义页面中增加了moving part #1（运动部件#1）选项，如图4-21所示。单击Creation of a new moving part（创建运动部件）选项后，系统询问是否复制现有运动部件的相关数据（见图4-22），单击No按钮后，进入运动部件#2的定义页面，通过Definition of the moving part domain选项，设定运动部件#2的区域。

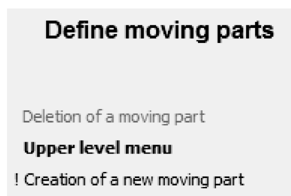


图4-18　运动部件定义页面

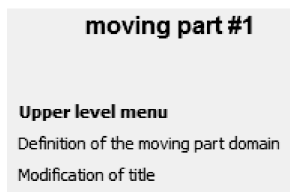


图4-19　运动部件#1设定页面

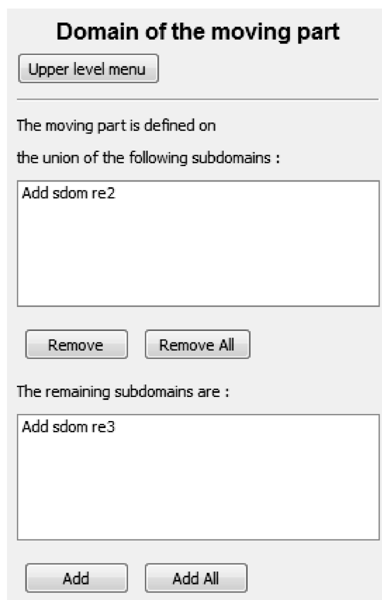
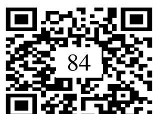


图4-20　运动部件区域选择页面（设定后的状态）

⊖ 值得注意的是，运动部件的顺序要和有限元流场计算任务中定义的顺序一致。



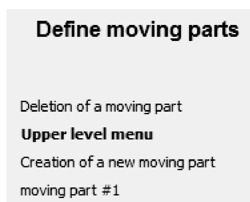


图 4-21　更新后的运动部件设定页面

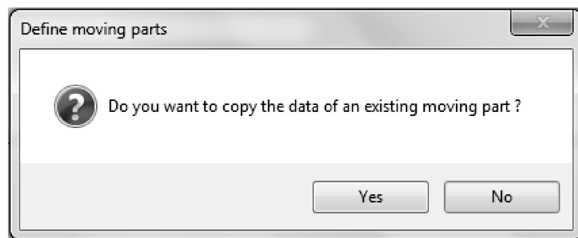


图 4-22　系统关于是否在现有运动部件基础上建立新的运动部件的提示

完成上述设定后，返回如图 4-4 所示的混合任务 1 设定页面，并逐步保存和退出 Polydata 窗口，完成混合任务的设定。返回 Polyman 窗口后，刷新文件树可以发现 mixing 任务对应的 dat 文件。选择 mixing 任务名称，单击运行按钮，系统将开始混合任务的计算。计算中可以通过 listing 文件查看计算进度，如图 4-23 所示。完成计算后会在结果文件中出现 mixing. mix 结果文件，用于后续的统计分析。

```
 ----------------------------------------------
 CREATION OF THE MIXING FILE Outputs\mixing.mix
 ----------------------------------------------


Material Point    1

(xo,yo,zo) =  0.7825239E-02-0.1140286E-01-0.1679195E-17
NORMAL Stop

Material Point    2

(xo,yo,zo) = -0.1508015E-01-0.8196148E-02-0.1734724E-17
NORMAL Stop

Material Point    3

(xo,yo,zo) = -0.2153567E-01 0.1092769E-02-0.1734724E-17
NORMAL Stop

Material Point    4

(xo,yo,zo) = -0.9187905E-02 0.1045253E-01-0.1734724E-17
NORMAL Stop

Material Point    5

(xo,yo,zo) =  0.1087906E-01 0.1037341E-01-0.1734724E-17
NORMAL Stop
```

图 4-23　通过 listing 文件查看计算进度



4.2　混合性能评价指标体系的建立

本节讲述使用 Polystat 统计模块进行混合性能评价指标体系创建的相关内容。进行统计分析的主要步骤包括：读取数据、设定切片、设定统计函数和观察存储统计结果。本例中，创建的统计函数主要包括：停留时间分布函数（评价轴向混合）、分布指数和分离尺度（评价分散混合）、最大剪切应力分布和少组分粒径变化（评价分散混合）。

4.2.1　启动 Polystat 统计模块

混合任务计算完成后，在对应的仿真文件树中出现了名为 mixing. mix 的文件（见图 4-24）。选中 TSE_mixing 仿真文件树的任务名后，通过 Polyman 窗口的 Programs 下拉菜单，进入 Others 子菜单，单击其中的 polystat 命令，启动 Polystat 统计模块。Polystat 窗口如图 4-25 所示，其中包括 File（文件）、Properties（属性）、Trajectories（轨迹）、Slices（切片）、Statistics（统计）和 Help（帮助）等六个菜单。

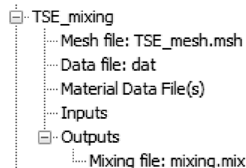


图 4-24　TSE_mixing 文件树

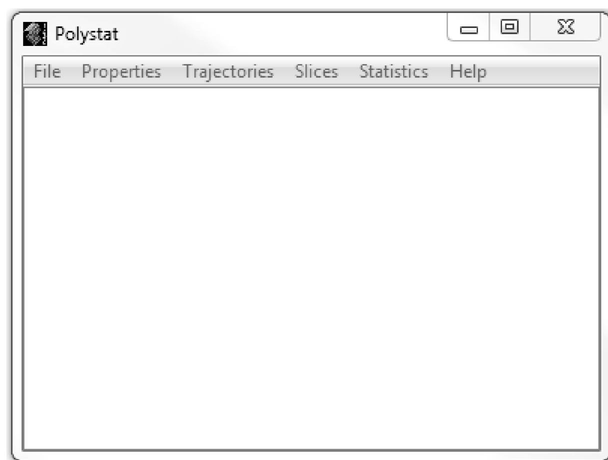


图 4-25　Polystat 窗口

4.2.2　数据读取

1. 读取混合任务结果文件

在 Polystat 窗口内单击 File 菜单中的 Read Data 命令，打开如图 4-26 所示的 Read Mixing files (created with Polyflow)（读取混合任务结果文件）对话框，单击 Add（添加）按钮后，



在出现的文件浏览器中选中仿真任务 TSE_mixing 包含的 Outputs 文件夹中的 mixing. mix 文件，打开如图 4-27 所示的格式化系统询问对话框，询问该文件是否为格式化输出类型文件（ACSII）。单击 Yes 按钮关闭对话框⊖。设定完成后，单击 OK 按钮关闭读取混合任务结果文件对话框。

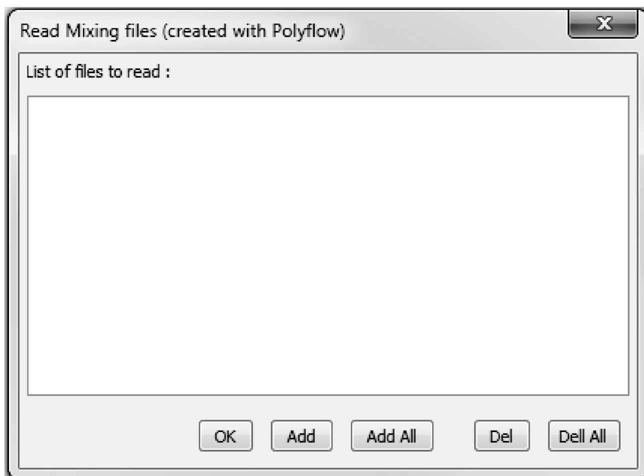


图 4-26　读取混合任务结果文件对话框

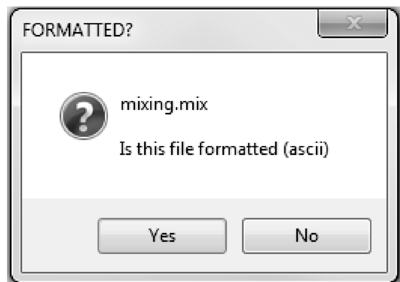


图 4-27　格式化系统询问对话框

2. 读取网格文件和流场结果文件

在 Polystat 窗口内单击 File 菜单中的 Read mesh 命令，打开如图 4-28 所示的 Read a mesh file（读取网格文件）对话框。在 Initial mesh（初始网格）栏中单击 Browser（浏览）按钮，找到流场任务或混合任务使用的 TSE_mesh. msh 文件，且选择 Formatted 类型选项。由于瞬态任务中的螺杆是旋转的，因此在 Moving parts motion（运动部件是否运动）栏中选中 Yes 选项。单击 Prefix of result files（流场结果文件前缀名）栏对应的 Browser（浏览）按钮，在瞬态流场任务 TES_01_time_depd_isothermal 的 Outputs 文件夹内选定 res_2. 1 文件。在该栏中将 First index（第一个结果文件序号）设定为 1，将 Last index（最后一个结果文件序号）设定为 30，且保持流场结果为默认的 Formatted 格式化类型。设定完成后，单击 OK 按钮关闭读取网格文件对话框。

⊖　这与混合任务中 4. 1. 8 节的相关设定是相关联的，当时选择了 formatted 格式，即 ASCII 类型的输出结果。



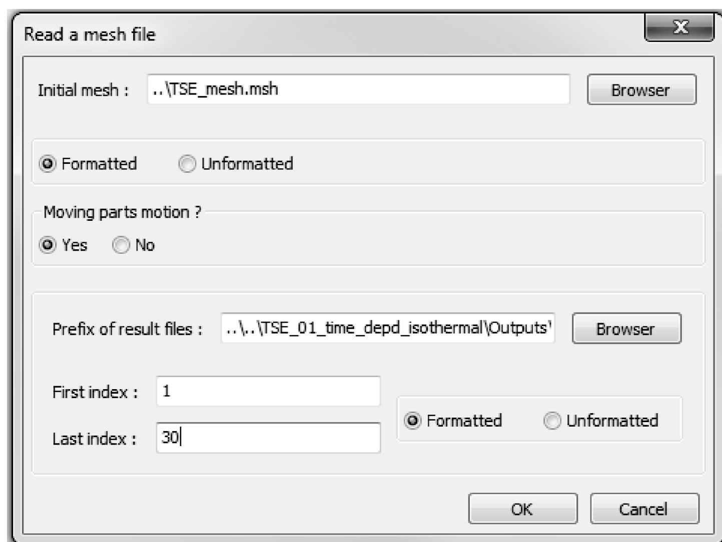


图 4-28　读取网格文件对话框（设定后的状态）

4.2.3　示踪粒子运动轨迹的动态显示

1. 时间切片的设定

单击 Polystat 窗口内 Slices 菜单中的 Automatic Slicing（自动建立切片）命令，打开如图 4-29 所示的时间切片设定页面。保持 Select a set of trajectories（选定一系列轨迹）栏中选择 All_trajectories（所有轨迹）选项。在 Select a property（选择属性）栏中选择 time 选项，然后将切片命名为 time。由于时间为标量，因此只需在 the first position（第一栏）中给定数值即可，时间从 0 开始，该栏数值为（0,0,0）。时间的方向为发展到未来，所以 the direction（方向）栏只需要输入第一个分量，该栏输入数值为（1,0,0）。切片时间的增量为运动部件的

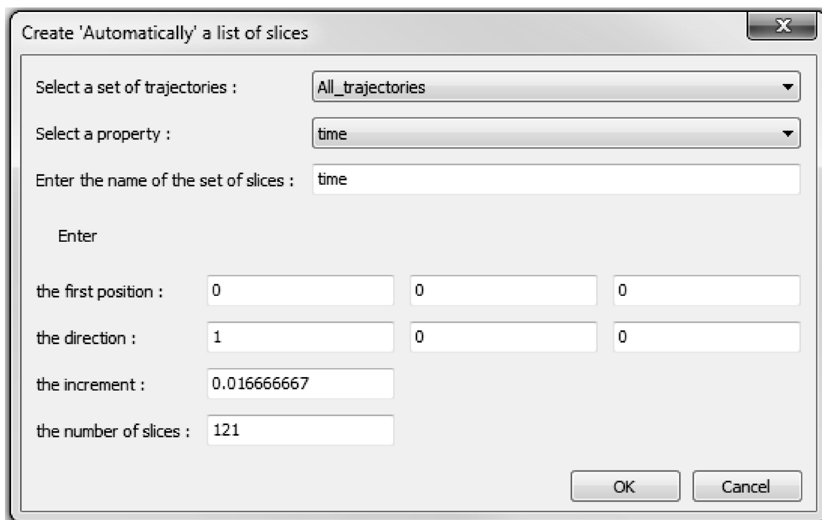
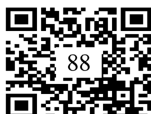


图 4-29　时间切片设定页面（设定后的状态）



相邻时间间隔，即 1/60s[1]。the number of slices（切片数）设定为 121 个[2]。设定完成后单击 OK 按钮，关闭对话框。

2. 运行计算及切片信息分析

单击 Polystat 窗口内 File 菜单中的 Run（运行）命令，执行相关计算。系统询问：是否基于当前设定进行计算（见图 4-30），单击 Yes 按钮即可。运行后，Polystat 窗口中会显示结果信息摘要。查看其中关于切片包含示踪粒子数量的内容，如图 4-31 所示。在 0 号切片中，共计包括 2000 个示踪粒子，但是在 1 号切片中只有 1811 个切片。这是因为入口边界上存在回流现象，部分布置在入口边界且速度方向为指向区域外侧位置上的示踪粒子会随着螺杆转动而离开计算区域。此后，随着螺杆转动还会有少量示踪粒子从入口离开。切片 66 ~ 89 中包含的示踪粒子数量均为 1525，可以认为这段时间内已经没有示踪粒子从入口离开，从切片 90（1.5s）开始有示踪粒子从出口离开，这与 4.2.4 节中的停留时间分布曲线的最短停留时间相对应。

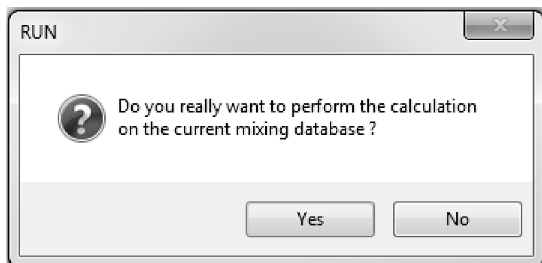


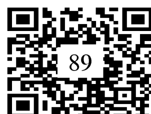
图 4-30　Polystat 运行提示

```
slice 0 contains 2000 instants
slice 1 contains 1811 instants
slice 2 contains 1786 instants
slice 3 contains 1773 instants
slice 4 contains 1745 instants
slice 5 contains 1709 instants
slice 6 contains 1683 instants
slice 7 contains 1667 instants
slice 8 contains 1651 instants
slice 9 contains 1619 instants
slice 10 contains 1606 instants
slice 11 contains 1596 instants
slice 12 contains 1585 instants
slice 13 contains 1576 instants
slice 14 contains 1564 instants
slice 15 contains 1557 instants
slice 16 contains 1554 instants
slice 17 contains 1552 instants
slice 18 contains 1548 instants
slice 19 contains 1543 instants
slice 20 contains 1540 instants
slice 21 contains 1539 instants
slice 22 contains 1538 instants
slice 23 contains 1535 instants
slice 24 contains 1532 instants
slice 25 contains 1531 instants
slice 26 contains 1531 instants
slice 27 contains 1530 instants
slice 28 contains 1530 instants
slice 29 contains 1530 instants
slice 30 contains 1530 instants
slice 31 contains 1530 instants
slice 32 contains 1529 instants
slice 33 contains 1529 instants
slice 34 contains 1529 instants
slice 35 contains 1529 instants
slice 36 contains 1529 instants
slice 37 contains 1529 instants
slice 38 contains 1529 instants
slice 39 contains 1528 instants
slice 40 contains 1528 instants
slice 41 contains 1527 instants
slice 42 contains 1527 instants
slice 43 contains 1527 instants
slice 44 contains 1527 instants
slice 45 contains 1527 instants
slice 46 contains 1527 instants
slice 47 contains 1527 instants
slice 48 contains 1527 instants
slice 49 contains 1527 instants
slice 50 contains 1527 instants
slice 51 contains 1527 instants
slice 52 contains 1527 instants
slice 53 contains 1527 instants
slice 54 contains 1526 instants
slice 55 contains 1526 instants
slice 56 contains 1526 instants
slice 57 contains 1526 instants
slice 58 contains 1526 instants
slice 59 contains 1526 instants
slice 60 contains 1526 instants
slice 61 contains 1526 instants
slice 62 contains 1526 instants
slice 63 contains 1526 instants
slice 64 contains 1526 instants
slice 65 contains 1526 instants
slice 66 contains 1525 instants
slice 67 contains 1525 instants
slice 68 contains 1525 instants
slice 69 contains 1525 instants
slice 70 contains 1525 instants
slice 71 contains 1525 instants
slice 72 contains 1525 instants
slice 73 contains 1525 instants
slice 74 contains 1525 instants
slice 75 contains 1525 instants
slice 76 contains 1525 instants
slice 77 contains 1525 instants
slice 78 contains 1525 instants
slice 79 contains 1525 instants
slice 80 contains 1525 instants
slice 81 contains 1525 instants
slice 82 contains 1525 instants
slice 83 contains 1525 instants
slice 84 contains 1525 instants
slice 85 contains 1525 instants
slice 86 contains 1525 instants
slice 87 contains 1525 instants
slice 88 contains 1525 instants
slice 89 contains 1525 instants
slice 90 contains 1524 instants
slice 91 contains 1501 instants
slice 92 contains 1488 instants
slice 93 contains 1477 instants
slice 94 contains 1451 instants
slice 95 contains 1422 instants
slice 96 contains 1383 instants
slice 97 contains 1357 instants
slice 98 contains 1318 instants
slice 99 contains 1276 instants
slice 100 contains 1259 instants
slice 101 contains 1241 instants
slice 102 contains 1227 instants
slice 103 contains 1211 instants
slice 104 contains 1186 instants
slice 105 contains 1174 instants
slice 106 contains 1155 instants
slice 107 contains 1145 instants
slice 108 contains 1130 instants
slice 109 contains 1122 instants
slice 110 contains 1106 instants
slice 111 contains 1097 instants
slice 112 contains 1087 instants
slice 113 contains 1074 instants
slice 114 contains 1057 instants
slice 115 contains 1050 instants
slice 116 contains 1029 instants
slice 117 contains 1014 instants
slice 118 contains 1005 instants
slice 119 contains 985 instants
slice 120 contains 968 instants
```

图 4-31　计算结果（摘要-切片信息）

[1] 推荐该数值与第 3.2.5 节中相邻流场结果之间的步长一致。

[2] 时间切片从 t = 0 开始，每隔 1/60s 取得一个，所在第 121 个切片的对应时间为 2s，螺杆转动两周。



3. 示踪粒子运动的动态显示

单击 Polystat 窗口内 File 菜单中的 Draw results 命令，打开如图 4-32 所示的轨迹观察器对话框，该对话框包含 Slice（切片）、Prop（属性）和 Mesh（网格）三个子页面。在 Slice 子页面中，要对切片和运动部件的动态显示参数进行设定，保证二者协调一致。在 Set of slices（切片组）栏中选择 time 切片组。在该栏中还要输入切片动态显示参数，包括初始切片序号（First id）和动态显示相邻两步之间间隔切片数（Step）。本例中这两参数分别设定为 0 和 1。在 Moving Parts（运动部件）栏中，选中 Set into motion（是否设定为运动模式）选项中的 Yes 选项，启动运动部件的运动模式。此外，还要设定与序号为 0 的时间切片相应的流场结果序号。如前所述，在第 30 个流场结果中螺杆正好转回初始位置，所以要在该栏中第一个流场结果序号（First id）后的文本框内输入 30。同时，由于时间切片的时间间隔应与流场结果之间的时间间隔是一致的，因此相应的间隔（Step）文本框内输入数值应与时间切片对应的间隔数值一致。这样才能真实地体现运动部件运动与示踪粒子位置的对应关系⊖。单击 Draw 栏中的 First 按钮，显示粒子布置的初始位置（见图 4-32）。

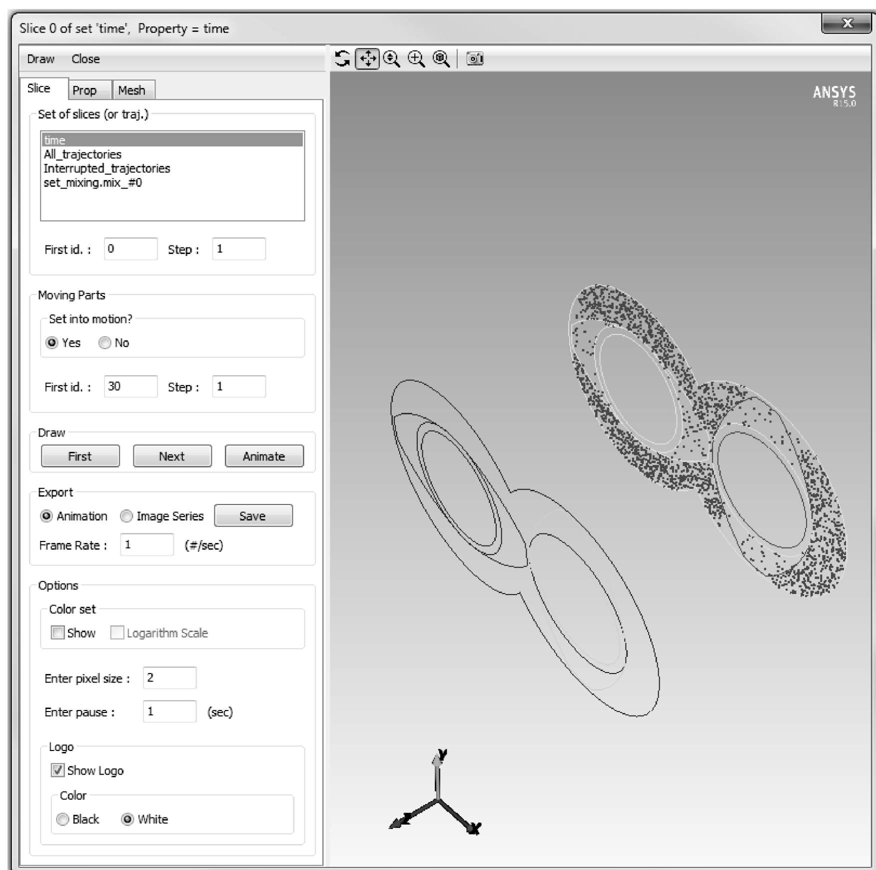


图 4-32　轨迹观察器对话框的 Slice 子页面（设定后的状态）

⊖ 在时间切片的设定中，如果时间切片的时间间隔为 1/6s，即当前步长的 10 倍，那么为了确保切片与运动部件的动态显示协调一致，这里 Moving Parts 栏的 Step 步长也应修改为当前值的 10 倍，即 10。



在 Mesh 子页面中（见图 4-33），主要分为两个区域，上面为待选区，下面为选定区，其中带有“$”符号的选项为边界轮廓。默认状态中，选定区包括所有的边界轮廓。将组成两个螺杆轮廓的八个边界添加到选定区。将两个螺杆分别设定为黄色和浅蓝色。在选定区域中选中某一边界，然后在 Color 栏中更换其颜色。单击 Draw 按钮，更新后的显示状态如图 4-33 中的图形窗口所示，视图窗口中的图像的方向可以用鼠标调整⊖。

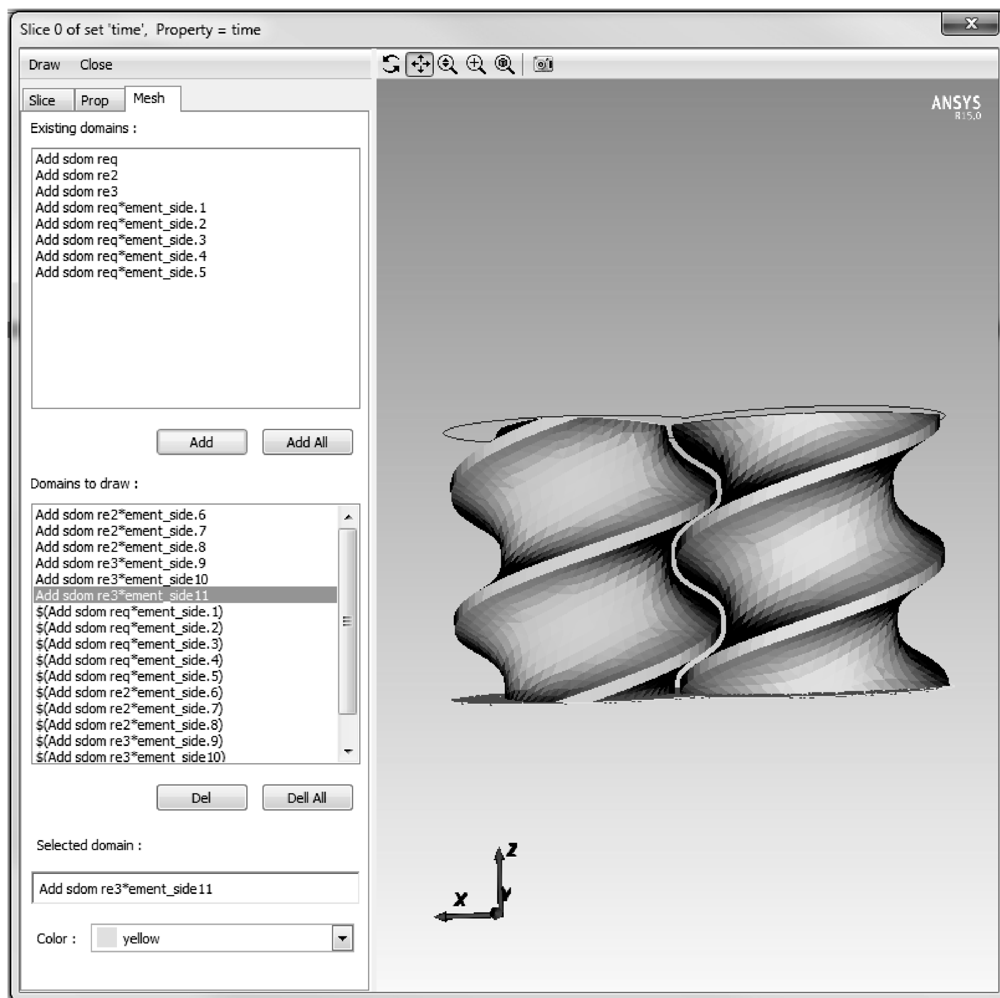
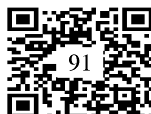


图 4-33　轨迹观察器对话框的 Mesh 子页面（设定后的状态）

返回如图 4-32 所示的 Slice 子页面，单击 Draw（绘制）栏中的 Next 按钮，螺杆旋转的同时，入口布置的示踪粒子往前输送，其过程如图 4-34 所示。单击 Close 按钮，关闭轨迹观察器对话框。

在 Polystat 窗口内单击 File 菜单中的 Save 命令，将当前 Polystat 的相关设定以 . sav 格式的文件进行存储，方便下次使用时直接调用。

⊖ 鼠标左键为平移；中键为旋转；右键为放大。



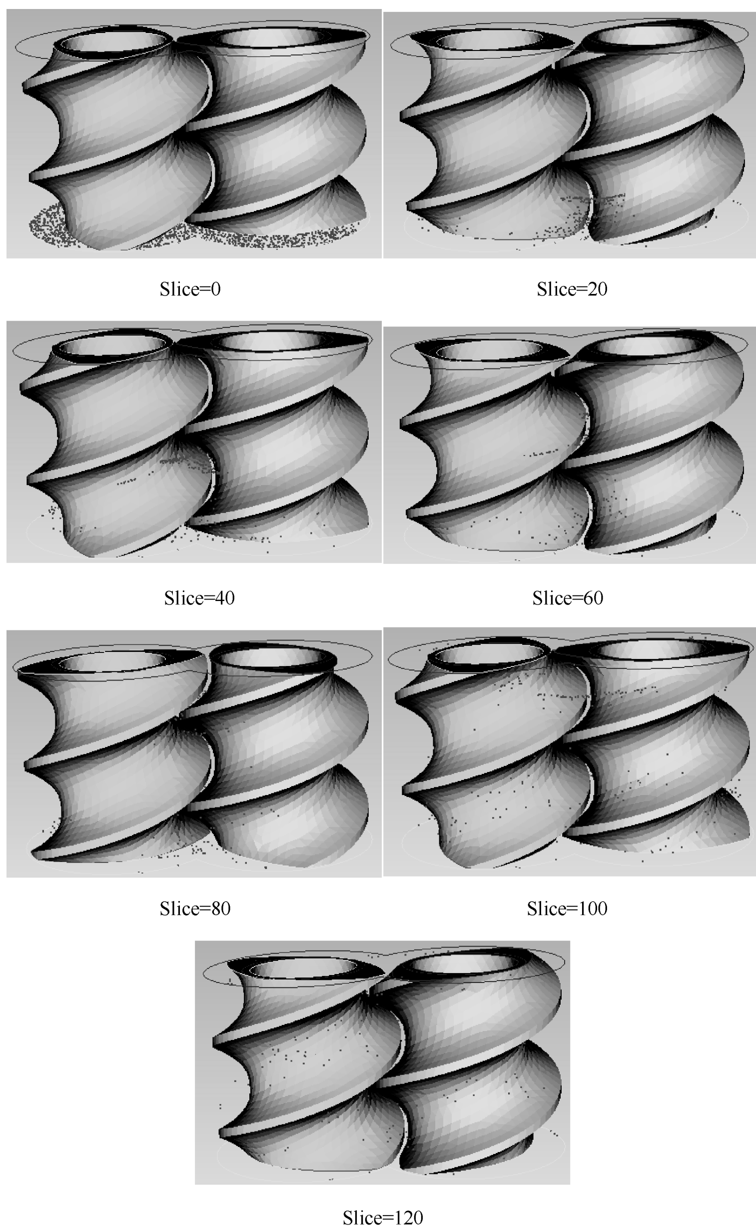


图 4-34　粒子轨迹运动过程

4. 2. 4　停留时间分布的统计

停留时间分布是衡量螺杆元件轴向混合性能的重要指标，分为累积停留时间分布函数和停留时间分布函数，分别由概率函数和概率密度函数表示。本节将讲述如何在 Polystat 模块中统计停留时间分布。

1. 出口切片

单击 Polystat 窗口内 Slices 菜单中的 Automatic Slicing（自动建立切片）命令，打开如



图 4-35 所示的出口切片设定页面。保持 Select a set of trajectories（选定一系列轨迹）栏中选择 All_trajectories 选项。在 Select a porperty（选择属性）栏中选择 coordinates（坐标）选项。将切片重命名为 exit。由于出口切片需要描述出口所在平面，需要由一个坐标点和一个方向向量来描述，因此在 the first position（原点）栏中输入（0,0,0.025）[⊖]，在 the direction（方向向量）栏中输入（0,0,1）。切片增量为 0，个数为 1。设定完成后单击 OK 按钮，关闭对话框。

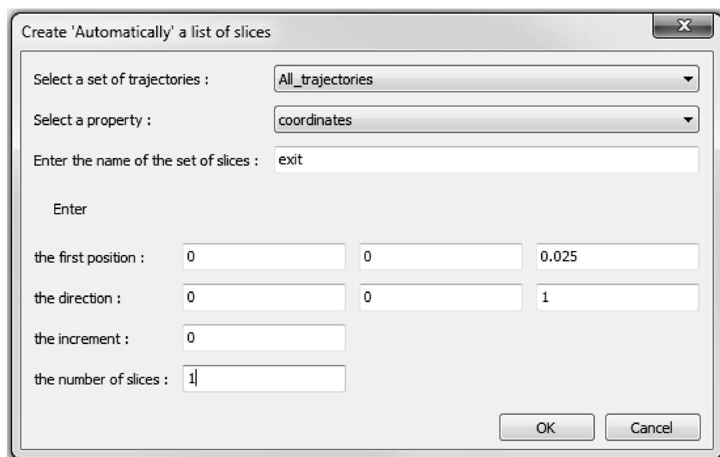


图 4-35　出口切片设定页面（设定后的状态）

2. 示踪粒子停留时间的概率函数及概率密度函数

单击 Polystat 窗口内 Statistics 菜单中的 Create a new function（创建函数）命令。在函数类型列表中选择 Probability Function（概率函数）选项，打开如图 4-36 所示的创建函数对话

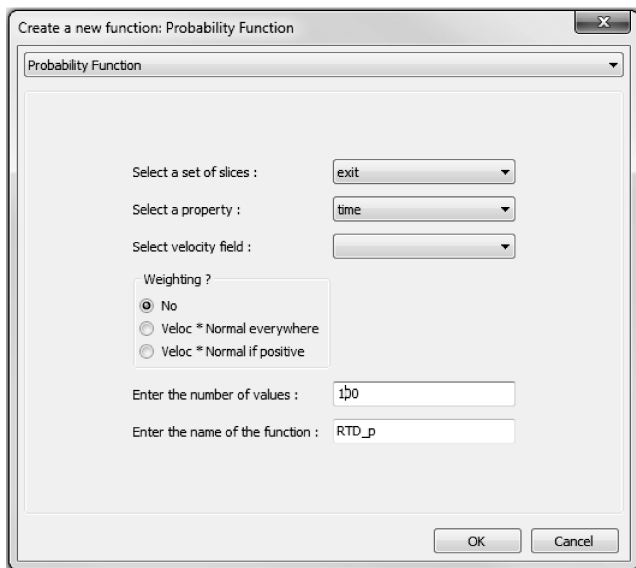


图 4-36　创建函数对话框-累积停留时间分布函数（设定后的状态）

⊖ 本例模型轴向长度为 25mm。



框。在 Select a set of slices（切片组）栏中选择 exit（出口切片）选项，在 Select a property（选择属性）栏中选择 time 属性。无须选择速度场，且不考虑权重。计算得到概率函数（即累积停留时间分布函数）曲线上包括 100 个数据点，函数命名为 RTD_p。单击 OK 按钮，关闭对话框。

单击 Polystat 窗口内 Statistics 菜单中的 Create a new function（创建函数）命令。在函数类型列表中选择 Density of Probability Function（概率密度函数）选项，打开如图 4-37 所示的创建函数对话框。概率密度函数是概率函数经微分算法获得的。在 Select a distribution function（选择分布函数）栏中选择上一步设定的概率函数 RTD_p。该曲线中初定点数为 100[⊖]，函数名为 RTD_d。单击 OK 按钮，关闭对话框。

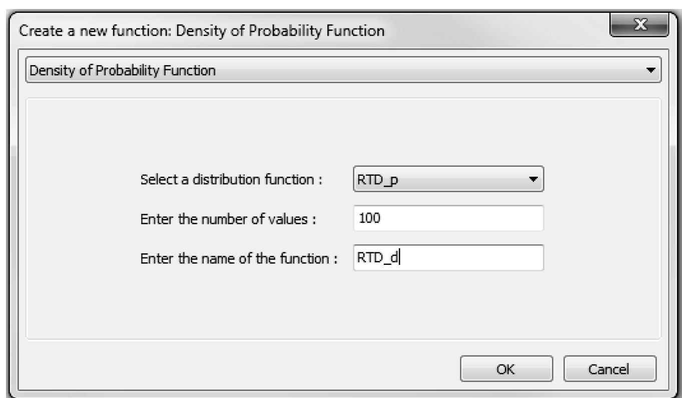


图 4-37　创建函数对话框-停留时间分布函数（设定后的状态）

3. 平均停留时间和停留时间分布方差

单击 Polystat 窗口内 Statistics 菜单中的 Create a new function（创建函数）命令。在函数类型列表中选择 Mean + Standard Deviation（平均值及方差）选项，打开如图 4-38 所示的创建函数对话框。切片选择为 exit 出口切片，选择属性为 time。无须选择速度场，且不考虑权重。函数命名为 mean_RTD。单击 OK 按钮，关闭对话框。

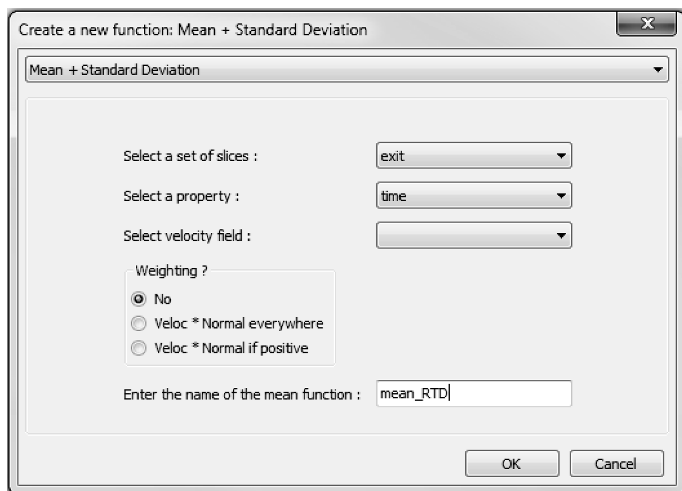


图 4-38　创建函数对话框-平均停留时间和分布方程（设定后的状态）

⊖ 由于采用了微分算法，因此最终曲线实际上包含 102 个点。



4. 结果显示与存储

单击 Polystat 窗口内 File 菜单中的 Run（运行）命令，运行相关操作。运行后，单击 File 菜单中的 Draws Stats 选项，打开如图 4-39 所示的 Draw Statistical Results（绘制统计结果）对话框。单击列表中的 RTD_p 选项，并在下方出现的曲线列表中勾选 Cum. Prob. of time in Slice 0（序号为 0 的切片上的累积时间概率函数）复选框。单击 OK 按钮后，在打开的 Polycurve（曲线绘制）窗口中，在 Chart（1）显示页面中出现累积停留时间分布曲线，如图 4-40 所示。接下来，为累积停留时间分布曲线的横纵坐标添标题。在 Chart（1）显示页面中单击鼠标右键，弹出如图 4-41 所示的快捷菜单，单击其中的 Properties（属性）选项，打开如图 4-42 所示的曲线属性对话框，其中包括通用子页面，X 轴子页面和 Y 轴子页面。在 X 轴子页面中（见图 4-42b）输入 X 轴标题（Title）为 time（s）。在 Y 轴子页面中（见图 4-42c），输入 Y 轴标题为 Probability Function。单击 Apply 按钮观察曲线显示状态，如图 4-43 所示。

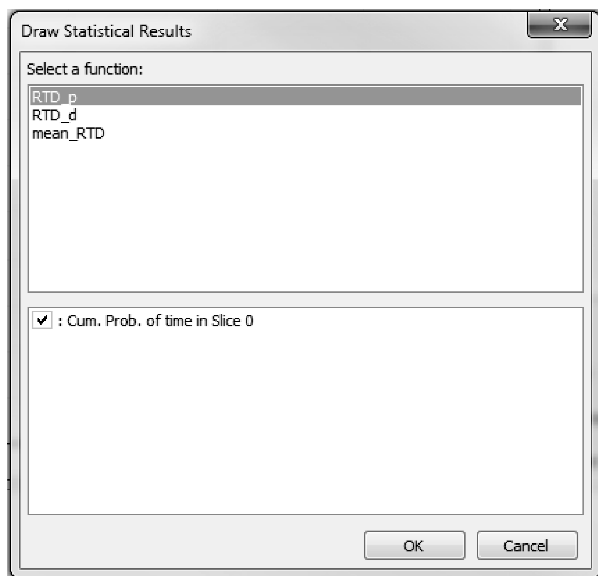


图 4-39　绘制统计结果对话框-累积停留时间分布曲线（设定后的状态）

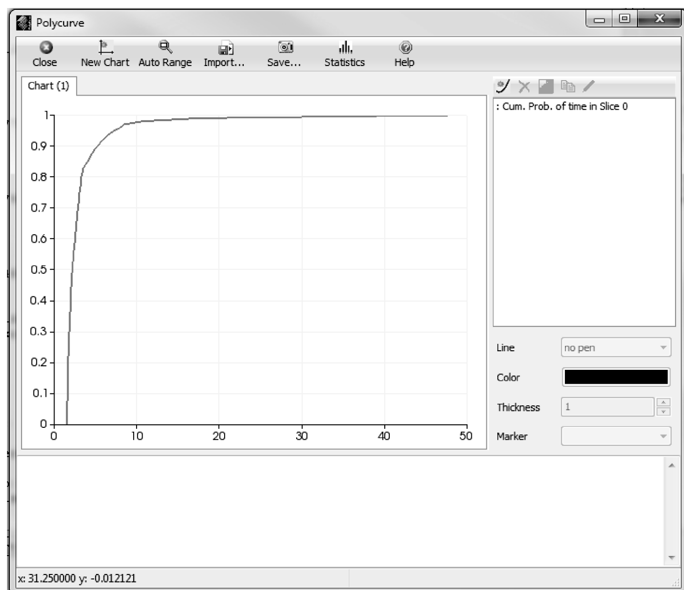
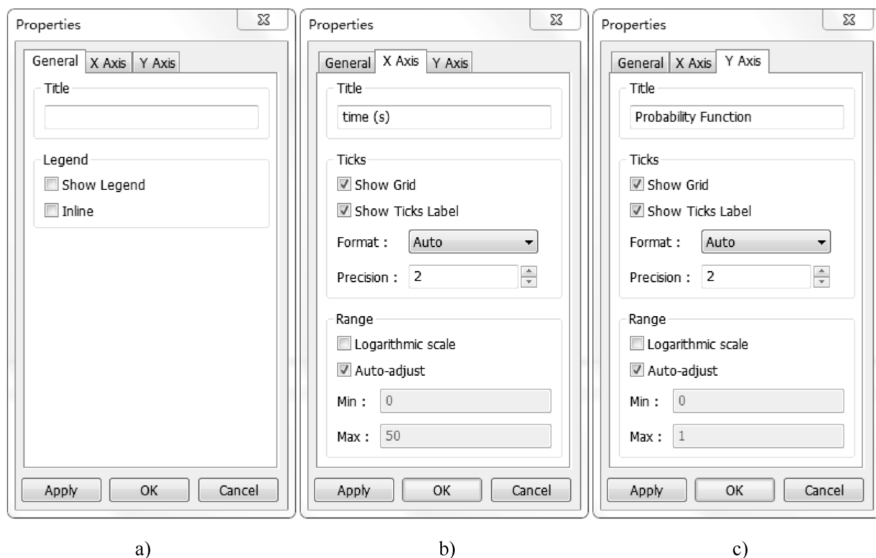


图 4-40　累积停留时间分布曲线





图 4-41　右键快捷菜单



a)　　　　b)　　　　c)

图 4-42　曲线属性对话框

a）通用子页面　b）X 轴子页面　c）Y 轴子页面

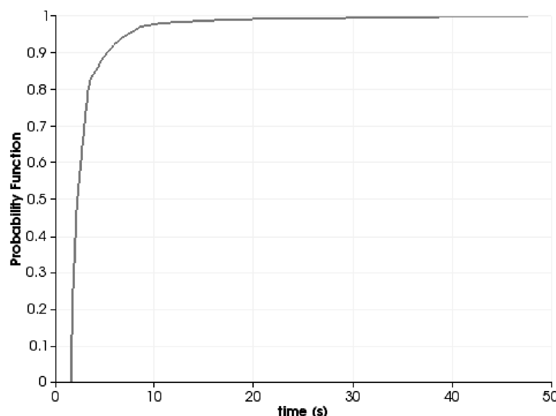


图 4-43　增加横纵坐标标题后的累积停留时间分布曲线

单击图 4-40 中的 New Chart（新建图表）按钮，出现名为 Chart（2）的显示页面，单击 Statistics（统计函数）按钮 Statistics，打开如图 4-39 所示的 Draw Statistical Results（绘制统计结果）对话框。单击列表中的 RTD_d 选项，在下方出现的曲线列表中勾选 density of Prob. of time in slice 0（序号为 0 的切片上的时间概率密度函数）复选框。单击 OK 按钮后，在打



开的 Polycurve（曲线绘制）窗口中出现停留时间分布曲线，如图 4-44 所示。图 4-44 中曲线的峰值在横坐标范围内显得过窄，需要对横坐标范围进行设定。在显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中单击 Properties（属性）选项，打开如图 4-42 所示的曲线属性对话框。在 X 轴子页面中输入 X 轴标题为 time（s），并取消勾选 Range 栏中的 Auto-adjust（自动调整 X 轴范围）复选框，该栏中 X 轴最大值设定为 15。在 Y 轴子页面中输入 Y 轴标题（Title）为 Density of Probability。单击 Apply 按钮观察曲线显示状态，如图 4-45 所示。

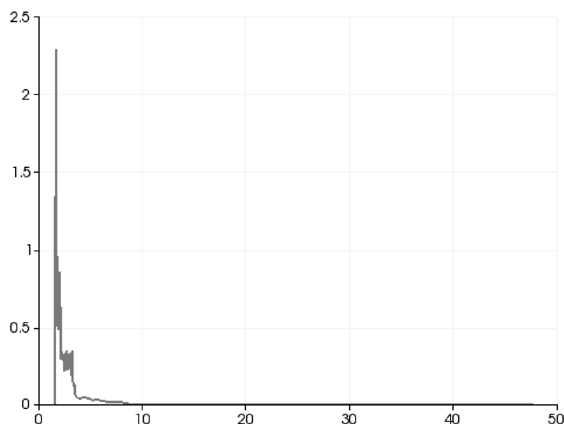


图 4-44　停留时间分布曲线（更新前）

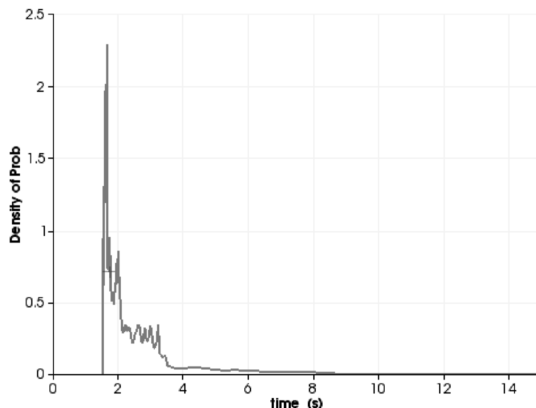


图 4-45　更新后的停留时间分布曲线

在 Polystat 窗口内单击 File 菜单中的 write stats 选项，打开如图 4-46 所示的 Save Statistical Results（存储统计结果）对话框，以存储统计结果。分别选择 RTD_p、RTD_d 和 mean_RTD 三个统计函数，单击 > >按钮，出现存储对话框。选定存储位置并命名后，存储 crv 文件。其中 mean_RTD 函数生成两个 crv 文件，每个文件中均包含一个数据，分别存储平均停留时间（3.12s）和停留时间分布方差（3.64s^2）。

在 Polystat 窗口内单击 File 菜单中的 Save 选项，将当前 Polystat 的相关设定以 .sav 格式的文件进行存储，方便下次使用时直接调用。



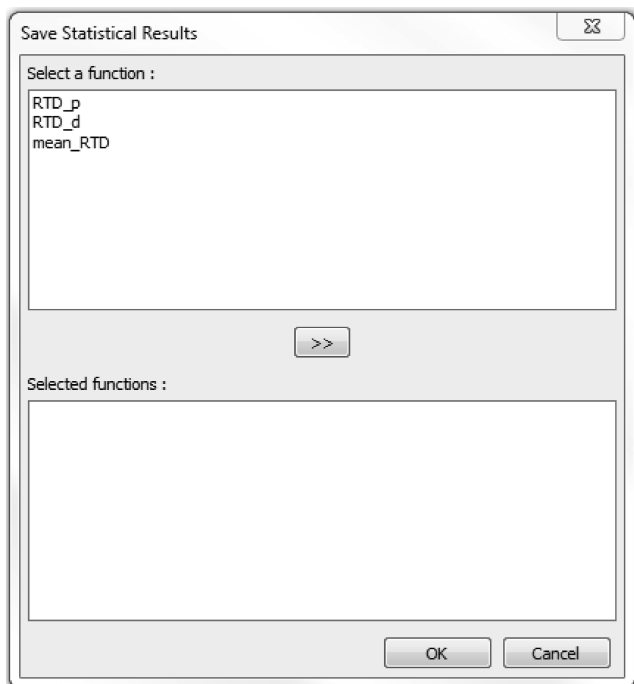


图 4-46　存储统计结果对话框

4.2.5　分布混合特性的衡量——分布指数、分离尺度

1. 分布指数

分布指数是衡量分布混合性能的有效指标。对于封闭空间的混合来说，初始时刻，少组分示踪粒子团聚在一起。随着混合的进行，团聚体分散到整个流体空间。可以使用示踪粒子的距离分布来判断当前示踪粒子的分布均匀性与最优分布之间的差异，两者差异越大，说明分布均匀性越差；两者差异越小，说明分布均匀性越好。

示踪粒子的最优分布该如何获取？对于这个问题，下面从两个方面进行讨论。第一是计算区域。为了保证有可比性，特别是对不同类型的螺杆元件进行对比时，最优分布的计算区域的选择需要保证所有情况对应的最优状态尽可能相似。为此，针对每个工况选取其流体区域内同样数量的示踪粒子的随机分布为最优分布。第二是示踪粒子的数量。对于把示踪粒子布置在螺杆元件入口的情况来说，由于入口存在反流，会有一定的示踪粒子不会流入计算区域，因此要根据进入流体区域的示踪粒子数量来确定最优分布内的示踪粒子数量。

（1） 最优分布的获得

在 TSE_mixing 计算任务的基础上进行修改，计算示踪粒子在螺纹元件区域内的最优分布。在 Polyman 窗口中新建名为 TSE_mixing_opt 的计算任务，并将 TSE_mixing 任务中的 msh 文件和 dat 文件复制到该计算任务中。双击 dat 文件，启动 Polydata，对 TSE_mixing_opt 任务进行修改设定。打开如图 4-47 所示的混合任务的 Polydata 设定页面。单击该页面中最后一个选项 MIXING Task 1，进入混合任务 1 的设定页面（见图 4-48）。对示踪粒子的生成、粒子轨迹跟踪参数、结果存储和运动部件定义等四个方面进行修改。



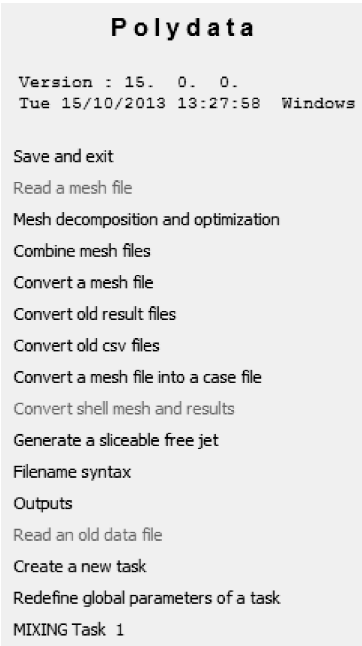


图 4-47　混合任务的 Polydata 设定页面

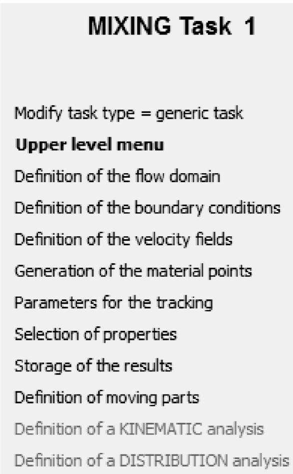


图 4-48　混合任务 1 的设定页面

1）示踪粒子的生成。

单击图 4-48 中的 Generation of the material points（示踪粒子生成）选项，进入如图 4-49 所示的示踪粒子生成页面。从该页面中可以看出，当前示踪粒子布置在流体区域的入口。单击 Modify a generation zone（编辑生成区域）选项，进入如图 4-50 所示的 Select a generation zone to modify（现有示踪粒子区域选择）列表页面，单击其中的 Generation Zone 1 选项，进入如图 4-51 所示的示踪粒子区域 1 设定页面。在图 4-51 中，将原本布置在入口边界上的示踪粒子（This zone is all the inflows of the flow domain）布置到整个流体区域（This zone is all the flow domain）。完成设定后返回图 4-48 所示的设定页面。

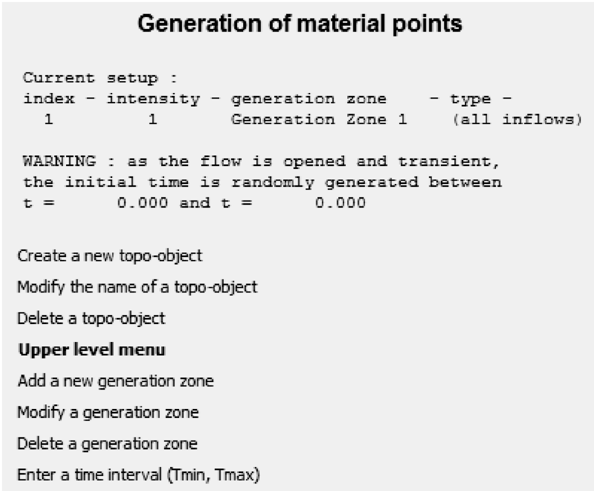


图 4-49　示踪粒子生成页面



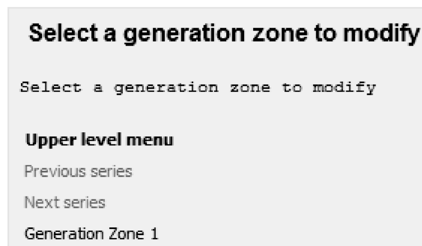


图 4-50　现有示踪粒子区域选择列表页面

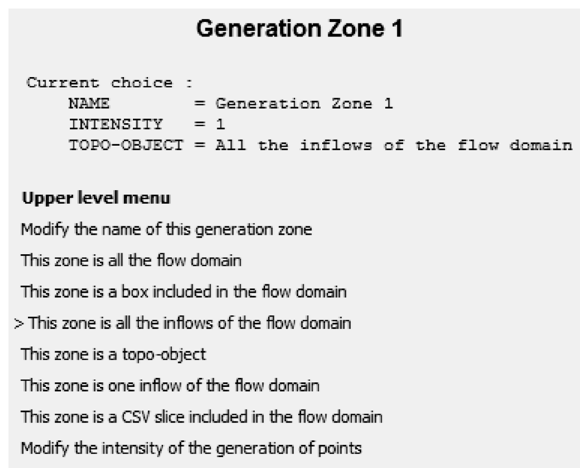


图 4-51　示踪粒子区域 1 设定页面

2）粒子轨迹跟踪参数。

单击图 4-48 中的 Parameters for the tracking 选项，进入如图 4-52 所示的跟踪参数设定页面，将其中的示踪粒子生命周期参数 TIMAX 修改为 0.00001，尽可能减少轨迹统计的计算时间⊖。

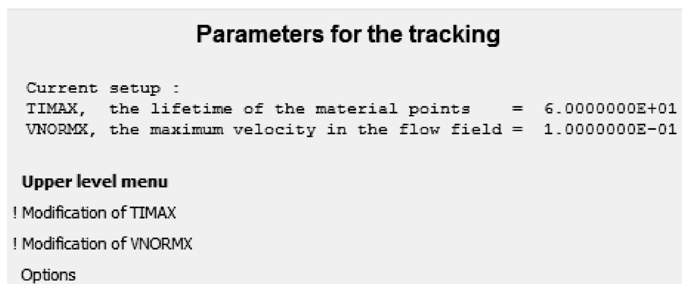
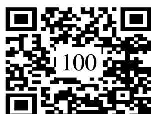


图 4-52　跟踪参数设定页面

⊖ 实际上，在最优分布的计算中，只关注流体区域内示踪粒子的初始分布。为此，将生命周期设定为一个很小的值，以减少计算耗时。计算中，是按照每流动 1mm 来进行一次轨迹数据存储，因此由于计算时间很短，所以结果只存储了初始位置的数据。



3）结果存储。

单击图 4-48 中的 Storage of the results（结果存储）选项，进入如图 4-53 所示的结果存储页面。该页面中可见，在瞬态混合任务的设定中，示踪粒子的数量为 2000 个。但是如前节所述，在入口处布置的示踪粒子，在流动的初始时刻离开了流体区域，所有这里需要将 2000 修改成实际流入流体区域的示踪粒子数，即 1525。完成设定后返回图 4-48 所示的设定页面。此外，通过 Modify the prefix of result files = mixing 选项，将结果名称的前缀修改为 mixing_opt。

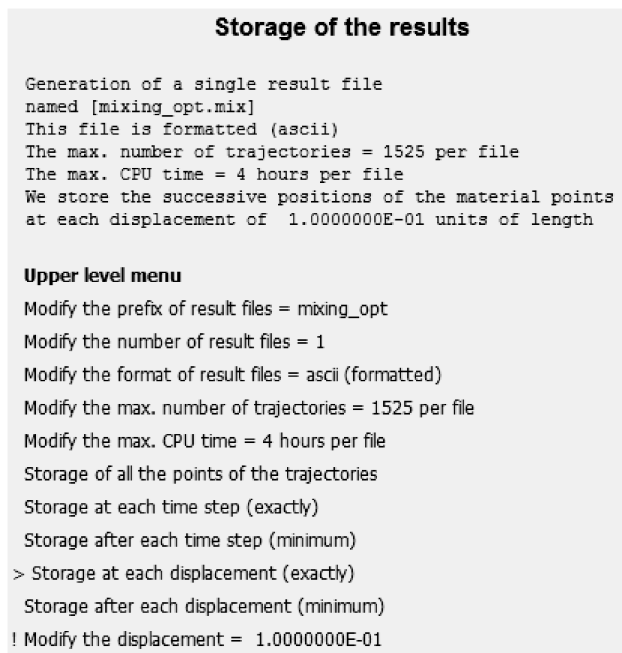


图 4-53　结果存储页面（设定后的状态）

4）运动部件定义。

单击图 4-48 中的 Definition of moving parts（定义运动部件）选项，进入如图 4-54 所示的运动部件设定页面。由于在最优分布的计算中，不考虑运动部件对流体空间的干扰，因此需要把两个运动部件删除。单击图 4-54 中的 Deletion of a moving part 选项，并在出现的删除运动部件页面（见图 4-55）中的现有运动部件列表中选择运动部件并将其删除。

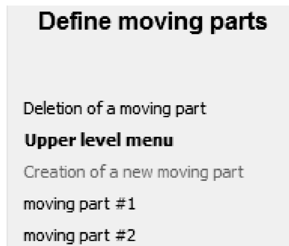


图 4-54　运动部件设定页面

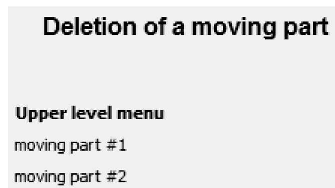
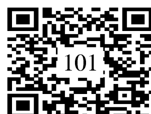


图 4-55　删除运动部件页面



完成修改后，退出 Polydata，并运行计算，获得 mixing_opt. mix 混合任务计算结果。

（2）分布指数的统计

1）瞬态过程中示踪粒子距离分布的统计。

在 Polyman 文件树中选中 TSE_mixing 计算任务，并启动 Polystat 模块。在其 File 菜单中单击 Read Data 命令，进入如图 4-56 所示的混合任务结果读取页面。单击 Add（添加）按钮，在 TSE_mixing 任务对应的文件夹中选择 mixing. mix 文件，按照格式化的 ASCII 格式文件进行读取。

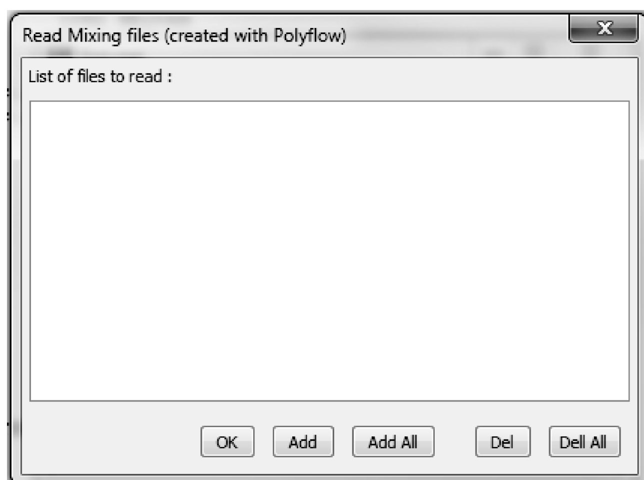


图 4-56　混合任务结果读取页面

在 Polystat 窗口的 Slices 菜单中单击 Automatic Slicing（自动切片）命令，在打开的自动切片创建对话框（见图 4-57）中，选择轨迹组为刚导入的 mixing. mix 组[⊖]，将切片名称设定

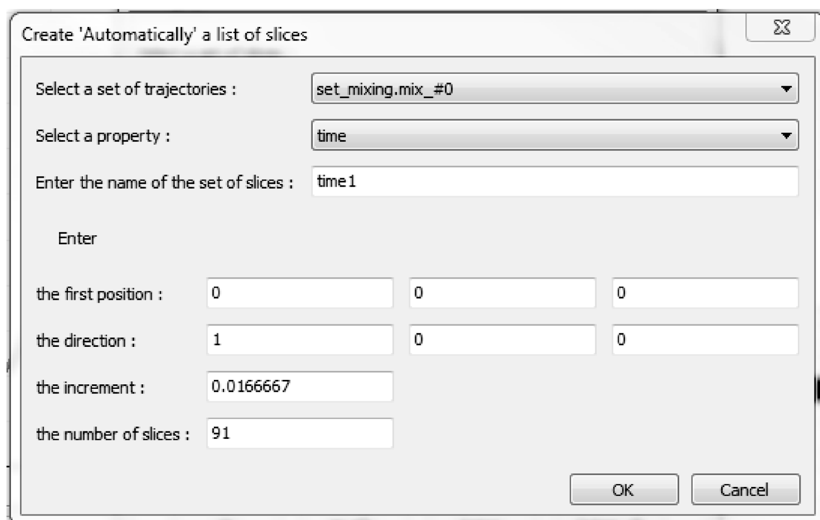
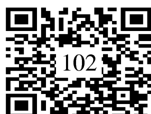


图 4-57　自动切片创建对话框（设定后的状态）

⊖　系统默认选项为 All_tracjectories，本例中要统计 mixing. mix 组的相关特性。



为 time1，在保持原点（0,0,0）不变的情况下，将方向修改为（1,0,0）[1]。切片增量为 1/60s[2]，且切片总数为 91[3]。

在 Polystat 窗口的 Statistics 菜单中，单击 Create a new function 选项，选择 Distance distribution 选项，打开如图 4-58 所示的距离分布函数设定对话框，选择名为 time1 的切片组，保持默认的 coordinates 坐标系，并以所有示踪粒子点对为对象，进行距离分布计算。其中，粒子间距范围设定为 0 ~ 0.05324m[4]。统计曲线点数设定为 100，且分布函数命名为 distribution_function_1。

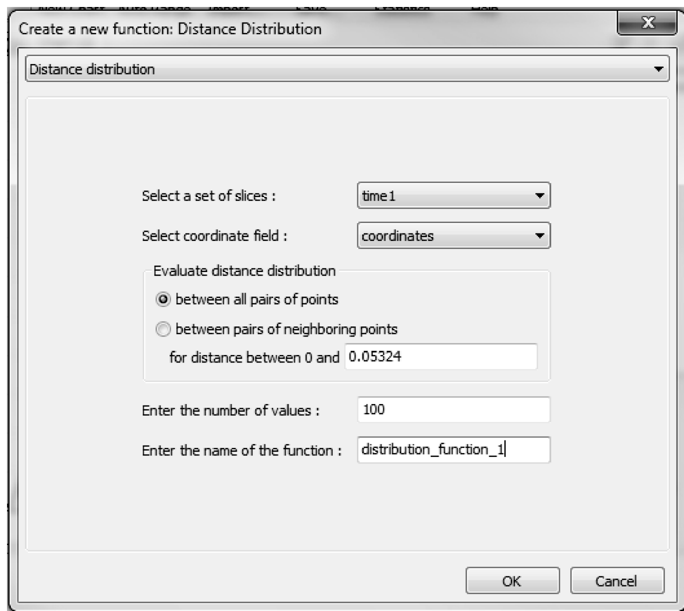


图 4-58　距离分布函数设定对话框（设定后的状态）

设定后，通过 Polystat 窗口的 File 菜单中的 Run（运行）选项进行计算。计算后，选择 Draw stats（绘制统计曲线）选项进行曲线绘制。单击图 4-59 中上方区域列表中的 distribution_funciton_1 选项，会出现该图中下方区域的曲线列表。选中切片 30、45、60、75 和 90 的统计结果[5]，图形窗口中显示出这五条曲线对应的时间下的示踪粒子距离瞬态分布曲线（见图 4-60）。

2）最优分布中示踪粒子距离分布的统计。

与瞬态过程中示踪粒子距离分布相同，将 TSE_mixing_opt 任务对应的文件夹中的 mixing_opt. mix 文件，按照格式化的 ASCII 格式进行读取。

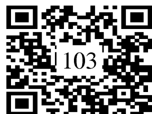
[1] 时间为标量，这里设定的所谓方向向量没有方向的意义。软件规定，当属性为标量时，此处设定为（1,0,0）。

[2] 此处给定的时间间隔与瞬态流场任务中输出结果的时间间隔一致，或者为该时间间隔的整数倍。

[3] 切片总数为 91，切片标号从 0 开始，到 90 结束，且切片 90 对应的分布状态下示踪粒子的数量为 1501 个，此后切片中示踪粒子的数量小于最优分布状态下的示踪粒子数量（即 1525），样本数量差异过大，故不具有对比价值。

[4] 在示踪粒子距离分布的统计中需要给出粒子可能的间距范围，当两个示踪粒子重合时，其距离最小为 0；示踪粒子的最大距离为流体区域最小外接圆直径。

[5] 序号为 30 之前的切片中包含的示踪粒子数量大于 1530。



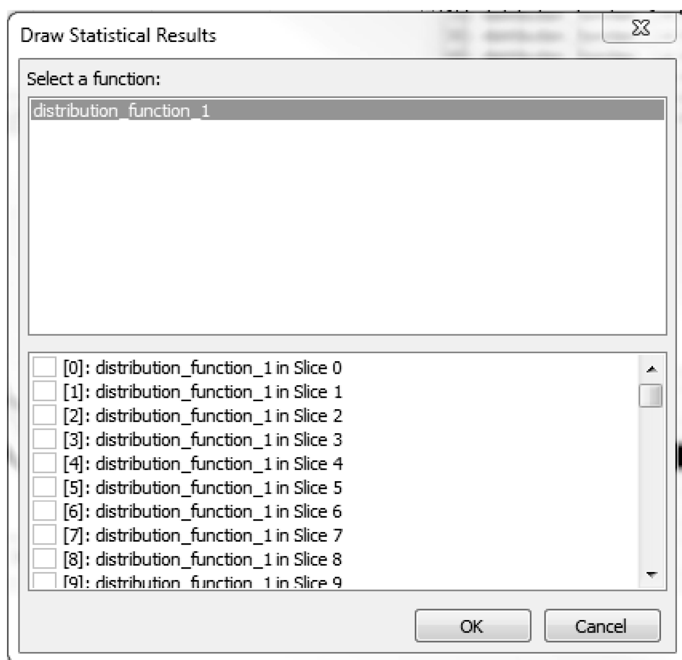


图 4-59　绘制统计结果对话框（设定后的状态）

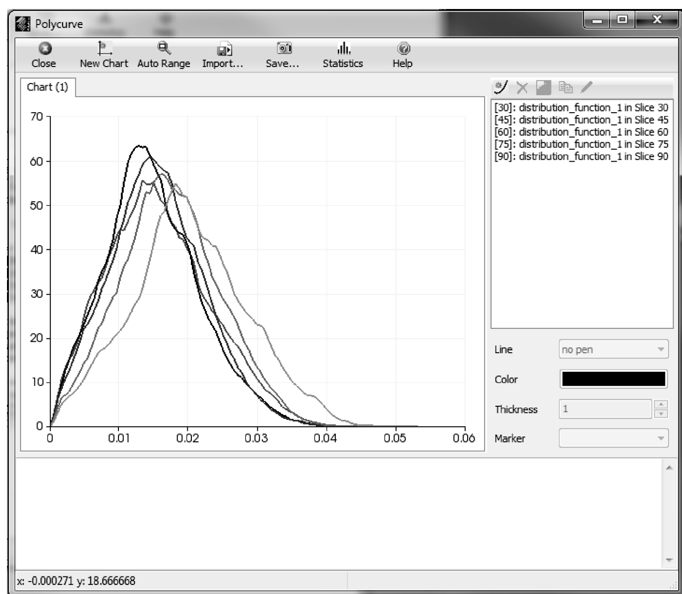
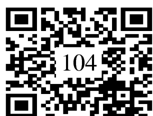


图 4-60　统计结果显示窗口-瞬态分布

在 Polystat 窗口的 Slices 菜单中，单击 Automatic Slicing（自动切片）命令，在打开的自动切片创建对话框（见图 4-57）中，设置轨迹组为刚导入的 mixing_opt. mix 组，将切片名称设定为 time2，在保持原点（0,0,0）不变的情况下，将方向修改为（1,0,0）。切片增量为



0s，且切片总数为 1⊖。

在 Polystat 窗口的 Statistics 菜单中，单击 Create a new function 命令，在打开的新建统计函数对话框（见图 4-58）中，选择 Distance distribution（距离分布）选项。在距离分布函数设定对话框中，选择名为 time2 的切片组，保持默认的 coordinates 坐标系，并以所有示踪粒子点对为对象，进行距离分布计算。其中，粒子间距范围设定为 0 ~0. 05324m。统计曲线点数设定为 100，且分布函数命名为 distribution_function_2。

设定并运行后，可得到如图 4-61 所示的示踪粒子距离最优分布曲线。

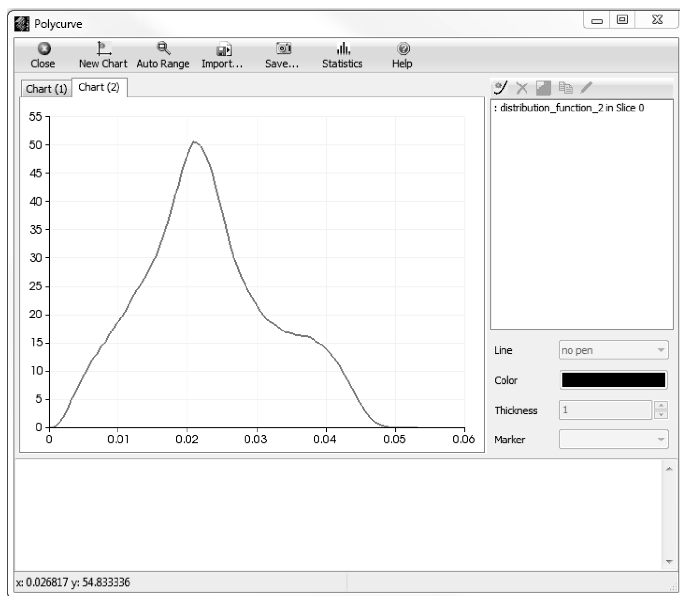


图 4-61　统计结果显示窗口-最优分布

3）分布指数的统计。

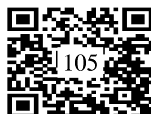
在以上示踪粒子距离瞬态分布和最优分布结果的基础上，根据分布指数的定义

$$\mathrm{DI} = \int_0^L |f(l) - f_{\mathrm{opt}}| \mathrm{d}l \tag{4-2}$$

进行分布指数统计计算。在 Polystat 窗口的 Statistics 菜单中，单击 Create a new function 命令，在打开的新建统计函数对话框中，选择 Deviation（偏差）选项，打开如图 4-62 所示的偏差函数设定对话框中，设置 Select a function 为瞬态分布 distribution_function_1，设置 Select the optimal 为最优分布 distribution_function_2。选中“integral（abs(f－f_opt)）/2”单选按钮，且将函数命名为 DI。

图 4-63 给出了分布指数的统计结果。图中的横坐标为对应时间切片序号，与时间间隔相乘后，可获得时间序列。纵坐标为瞬态分布与最优分布之间的差异。在统计的 90 个切片中，由于统计示踪粒子数量存在差异，因此前 30 个数据没有实际意义。随着螺杆转动，布置在入口边界上的示踪粒子被分散到流体区域内，瞬态分布与最优分布之间的差异呈现先增

⊖ 在最优分布中，使用初始随机分布作为最优分布，所以只有 1 个切片。



加的趋势，在切片46对应的状态下，两者差异最大。随后，两者差异减小。统计到序号为90的时间切片的原因是，其后的时间切片中，示踪粒子的数量又变少（示踪粒子开始从出口离开流体区域），样本数量不匹配，失去对比意义。

在Polystat窗口内单击File菜单中的Save命令，将当前Polystat的相关设定以.sav格式的文件进行存储，方便下次使用时直接调用。

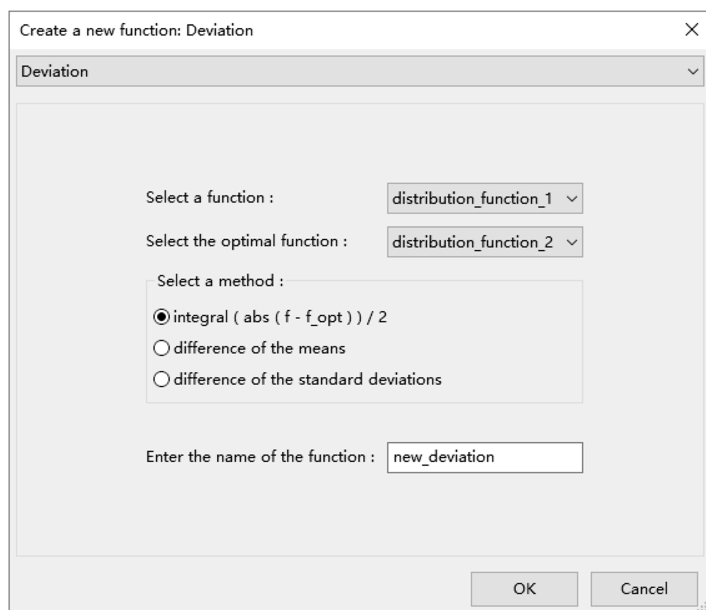


图4-62　偏差函数设定对话框

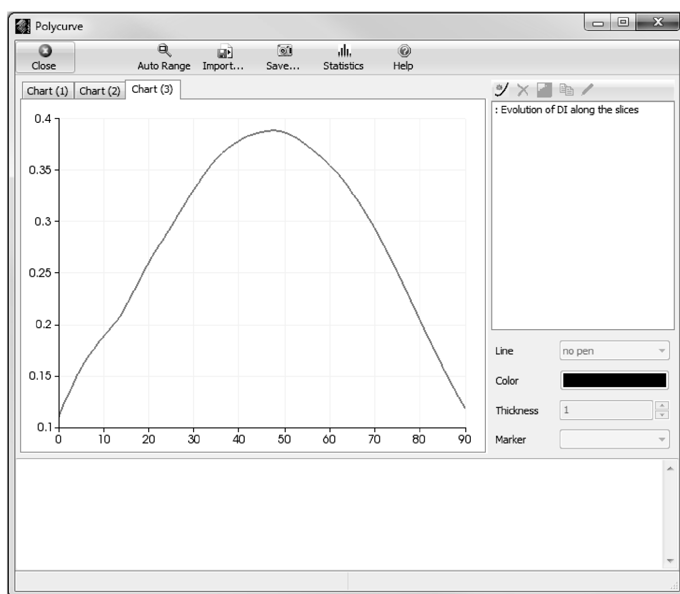
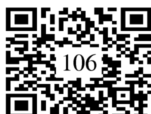


图4-63　分布指数统计曲线



2. 分离尺度

（1）定义浓度属性

在读取混合任务结果、网格文件和流场结果后，需要创建浓度属性。在 Polystat 窗口的 Properties 菜单中单击 Create a new property 命令，进入如图 4-64 所示的创建新属性对话框。单击属性选择下拉列表框，选择 Concentration 选项后，打开如图 4-65 所示的浓度属性设定对话框。在该对话框中，单击 Add 按钮，设定示踪粒子所在区域（见图 4-66）。该区域包络入口边界的右侧一半即可。选择 coordinates（坐标）选项，其 X 的取值范围设为 0 ~ 1，Y 的取值范围设为 −1 ~ 1，Z 的取值范围设为 −0.00001 ~ 0.00001。随后，在图 4-65 中单击 a slice 按钮，定义入口位置切片，如图 4-67 所示。切片的位置即入口所在平面。选择 coordinates（坐标）选项，并给定原点位置（0,0,0）和方向（0,0,1）。以上两步定义的立方体区域和过原点与 Z 轴平行的平面相交后，得到一个面域。示踪粒子初始位置处于该面域所在范围，其浓度数值将被定义为 1，其余示踪粒子的浓度属性数值为 0。

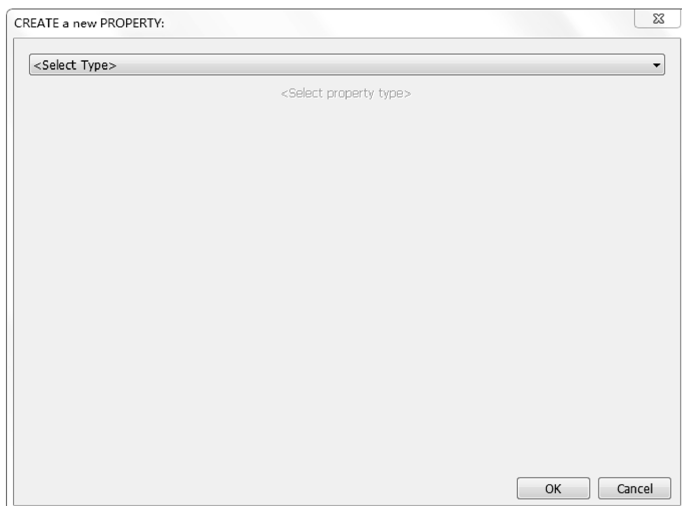


图 4-64　创建新属性对话框

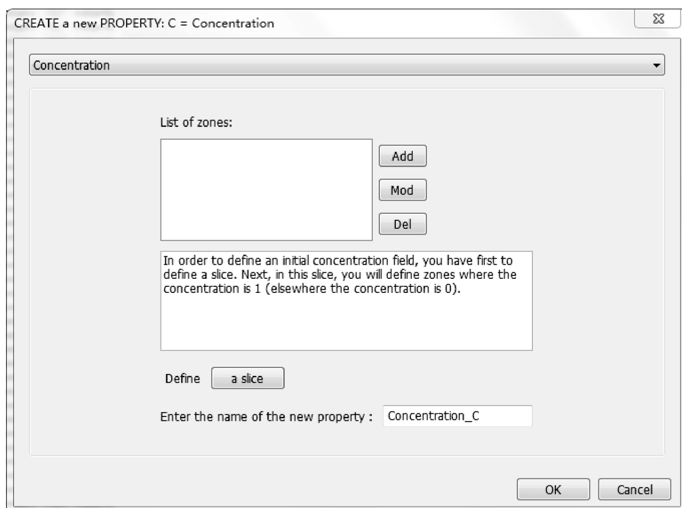
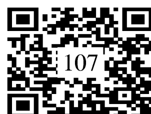


图 4-65　浓度属性设定对话框



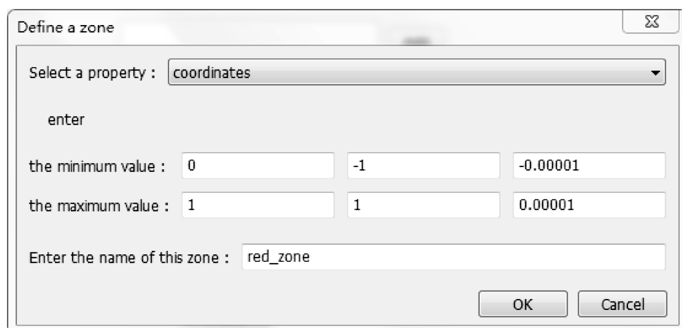


图 4-66　定义区域对话框（设定后的状态）

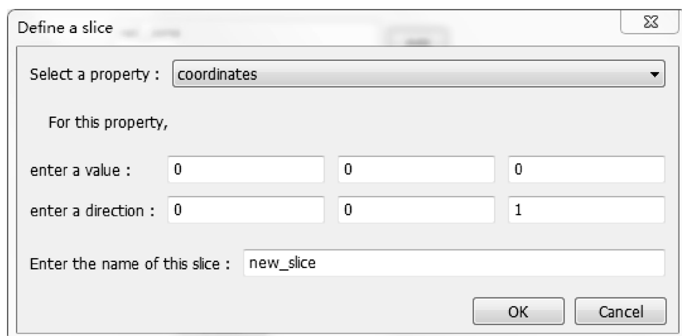


图 4-67　入口位置切片定义对话框（设定后的状态）

（2）创建时间切片

在 Polystat 窗口的 Slices 菜单中单击 Automatic Slicing 选项，定义时间切片属性。在如图 4-68 所示的对话框中，选定轨迹组为 All_trajectories（所有轨迹），属性选择为 time（时间），将该切片命名为 time。该切片的数值为：起点位置（0,0,0），方向（1,0,0），增量为 0.0166667㊀，切片数量为 121。

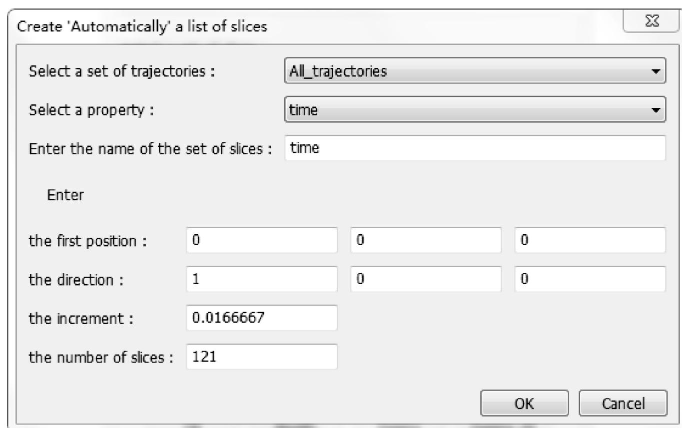
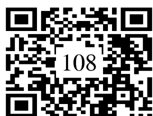


图 4-68　切片设定对话框（设定后的状态）

㊀ 时间切片的增量步长大小最好为螺杆元件运动步长的整数倍。



（3）定义分离尺度统计函数

在 Polystat 窗口的 Statistics 菜单中单击 Create a new function 命令，在子菜单中选择 Autocorrelation on Concentration 选项，在打开的如图 4-69 所示的浓度自相关函数定义页面中，选择上一步定义的时间切片，并选择浓度场属性 Concentration_C，保持默认的 coordinates 坐标系。在绘图时给定 100 数据点，其对统计函数进行命名（命名为 autocorrelation_function）。单击 OK 按钮关闭设定对话框。随后，再次创建 Segregation Scale（分离尺度统计）函数。在如图 4-70 所示的对话框中，选择之前定义的浓度自相关函数后，对统计函数进行命名（命名为 segregation_scale）。单击 OK 按钮完成设置。

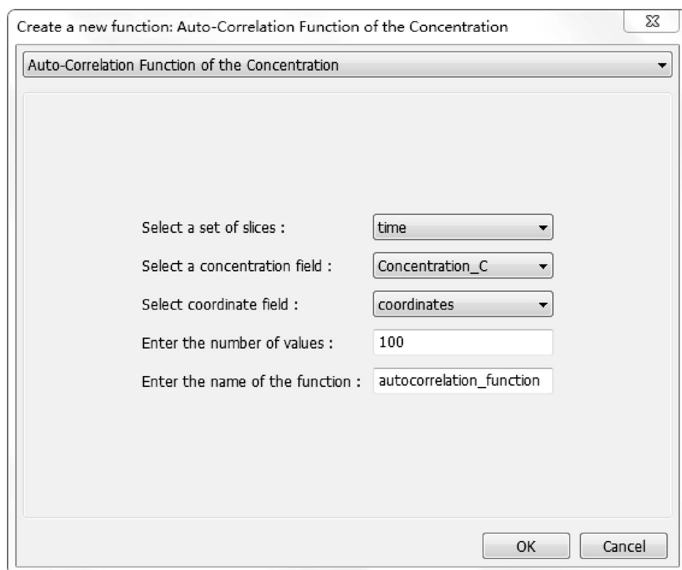


图 4-69　浓度自相关函数定义页面（设定后的状态）

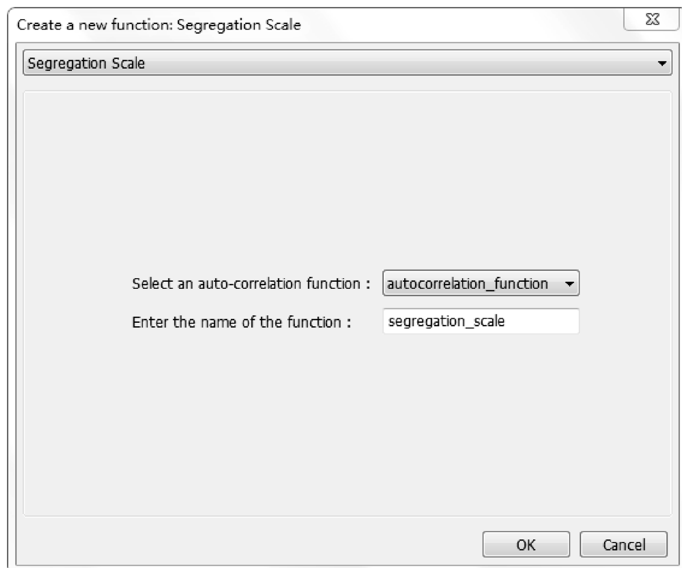
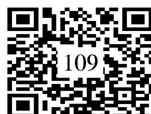


图 4-70　分离尺度定义对话框（设定后的状态）



（4）运行和结果查阅

在 Polystat 窗口的 File 菜单中单击 Run 命令，运行计算。通过 File 菜单中的 Draw results 命令，对混合过程进行直接观察。在如图 4-71a 所示的视图窗口的 Slice 子页面中，选择 time 切片，确认运动部件为可转动状态，且初始位置对应的结果序号为 30，单击 Draw 栏中的 First 按钮，更新视图窗口的显示状态。在如图 4-71b 所示的视图窗口的 Prop 子页面中，在保持坐标对应属性为 coordinates 的基础上，选择 Concentration_C 属性，该属性的取值范围为 0 ~ 1。在如图 4-71c 所示的视图窗口的 Mesh 子页面中，选择两个运动部件区域和流体区域的轮廓。单击 Draw 按钮后，更新图形显示区域的显示状态，如图 4-72 所示，图中入口侧布置的示踪粒子，根据初始位置的不同分别用红色和蓝色显示。在图 4-71a 中，单击 Draw 栏中的 Next 按钮，螺杆旋转，示踪粒子往前输送的同时，两种颜色的示踪粒子不断掺混，混合过程如图 4-73 所示。

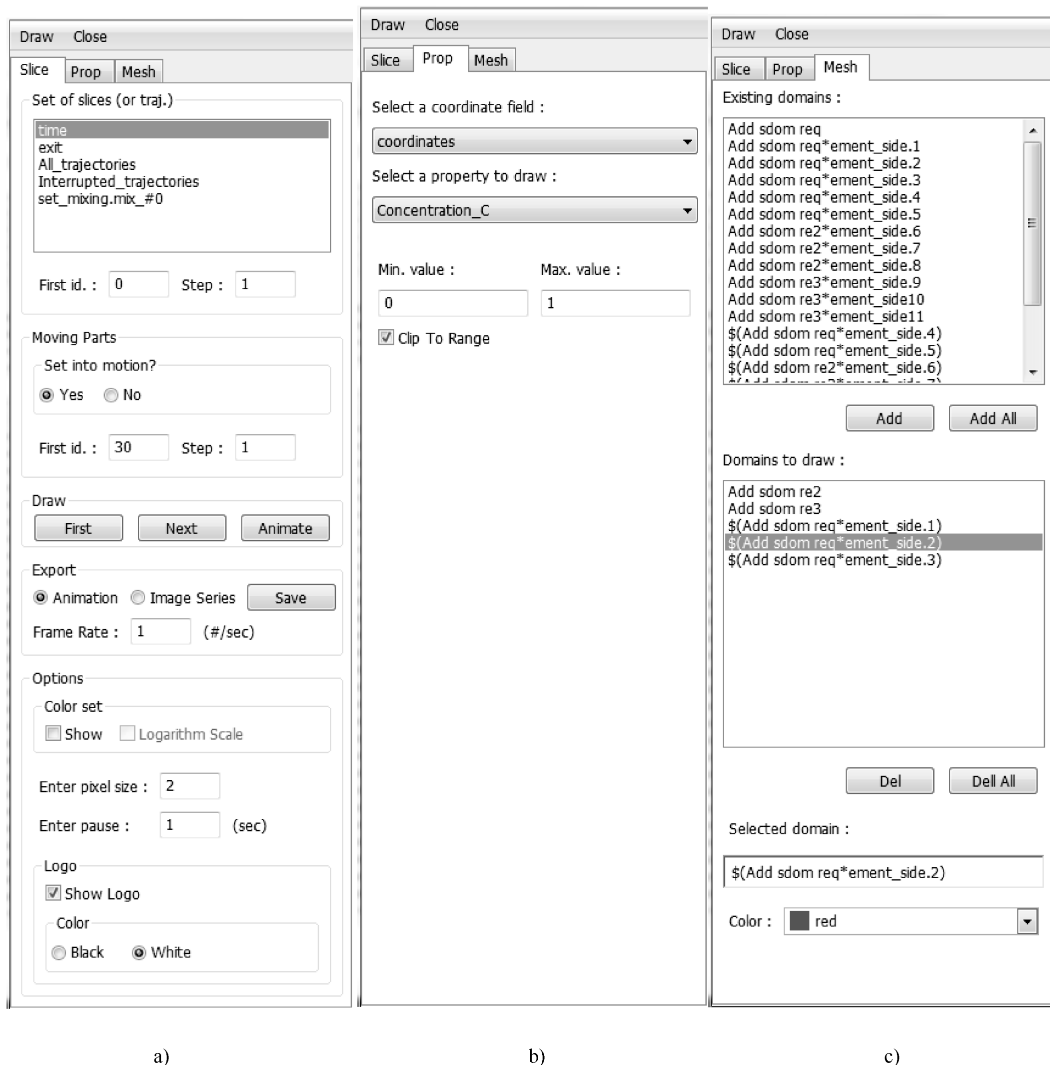
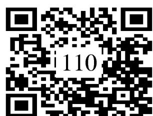


图 4-71 视图窗口的设定页面



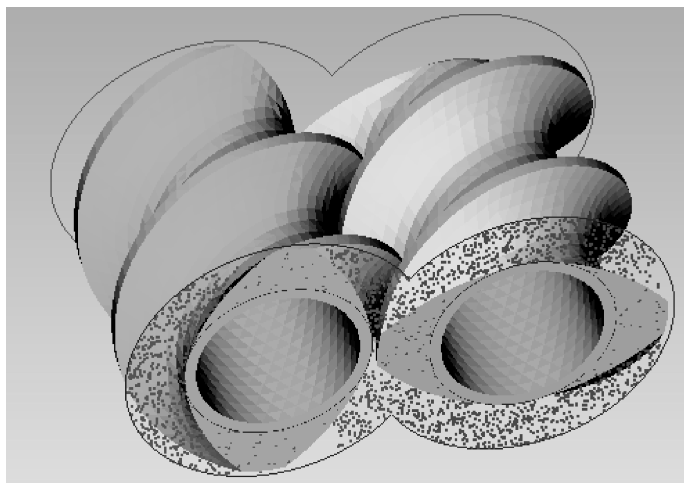


图 4-72　更新后的图形显示窗口

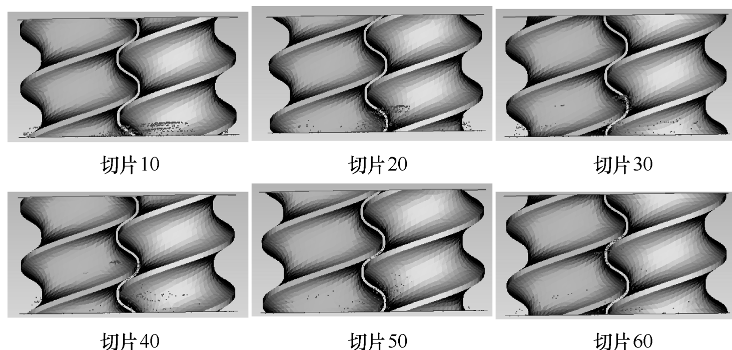


图 4-73　示踪粒子的混合过程

通过 File 菜单中的 Draw Stats 命令，可获得分离尺度统计曲线，如图 4-74 所示。图中曲线在初始时刻，由于两种颜色的示踪粒子处于入口切片的两侧，因此分离尺度数值较大，随着螺杆的掺混作用，分离尺度减少，由于螺杆元件的汇流作用，本来分散开的示踪粒子又聚集到一起，因此分离尺度数据在切片 60 ~ 120 之间呈现增大的趋势。随后，分离尺度再次下降，约切片 160 后，波动减小，曲线趋于平稳。但值得注意的是，切片 27 后，流体区域内的示踪粒子数量基本保持在 1530。此后，在切片 90 后，大量粒子从出口离开计算区域，即切片 90 后统计数据使用的样本数量是不断减少的。当示踪粒子数量较低时，统计失去意义。通过 File 菜单中的 Save Stat 命令可以对统计结果进行存储。

在 Polystat 窗口内单击 File 菜单中的 Save 命令，将当前 Polystat 的相关设定以 . sav 格式的文件进行存储，方便下次使用时直接调用。

值得注意的是，分布指数和分离尺度两个指标是从研究封闭区域内分散混合性能所演变过来的指标。由于螺杆挤出几何模型具有出口和入口边界，因此这两个指标的使用需要考虑流体区域内示踪粒子数量的变化。



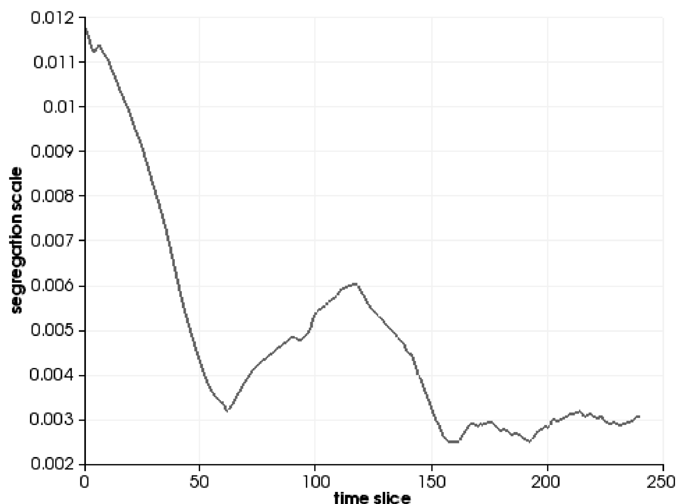


图 4-74　分离尺度统计曲线

4. 2. 6　分散混合特性的衡量——最大剪切应力、少组分粒径变化

1. 示踪粒子经历最大剪切应力的统计

示踪粒子经历最大剪切应力表示了示踪粒子在双螺杆挤出机内经历的剪切过程。经历高剪切的示踪粒子所占比例越大，表明螺杆的分散效果越好。

（1）最大剪切应力属性设定

首先，建立一个大小为$\sqrt{2}$的常数。在 Polystat 窗口内单击 Properties 菜单中的 CREATE a new property（创建新属性）命令，在打开的如图 4-75 所示的创建新属性对话框中，选择 k（constant）选项，并选中 Scalar 标量类型，取值为 1. 414，名称为 sqrt2。设定完成后，单击 OK 按钮，关闭对话框。

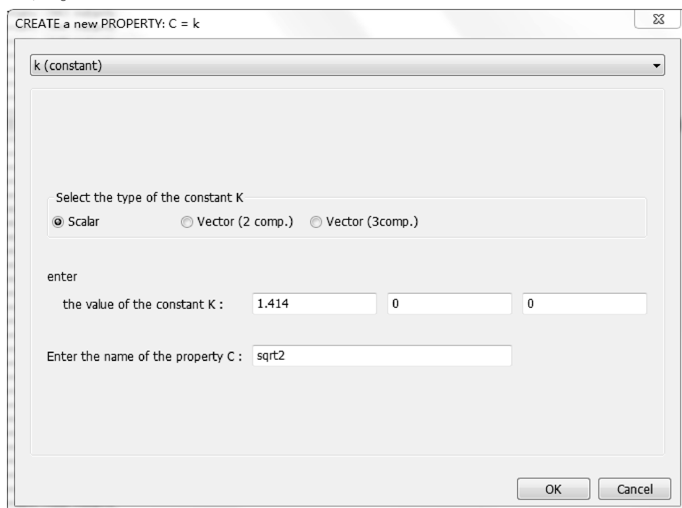
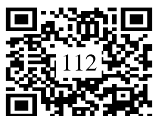


图 4-75　建立常数$\sqrt{2}$（设定后的状态）



其次，建立剪切速率的属性，其定义为耗散速率的$\sqrt{2}$倍。在图 4-76 所示的创建新属性对话框中，选择 A * B 类型。该乘法类型不属于标量相乘或向量相乘，而属于标量与向量相乘，所以选中 Other（其他）单选按钮。属性 A 和 B 分别为 sqrt2 和 rate_of_dissipation，新属性命名为 shear rate。

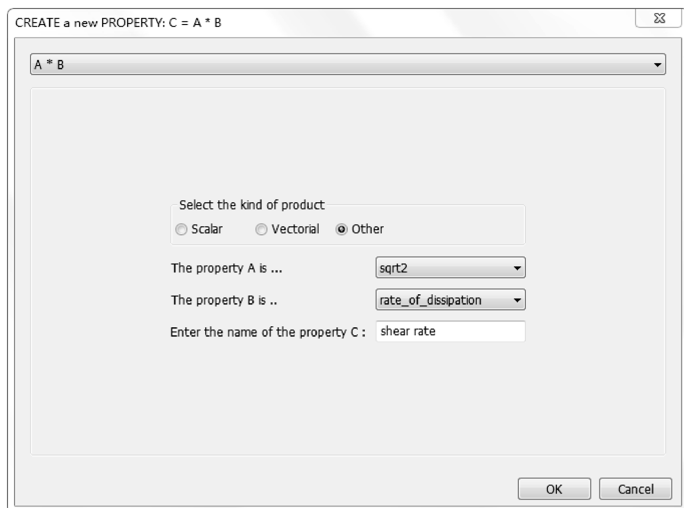


图 4-76　建立剪切速率（设定后的状态）

再次，建立剪切应力，其定义为某节点位置剪切速率与黏度的乘积。在图 4-77 所示的创建新属性对话框中，选择 A * B 类型，该乘法应为两向量的对应项相乘，所以选中 Other 单选按钮。属性 A 和 B 分别为 viscosity 和 shear_rate，命名为 shear stress。

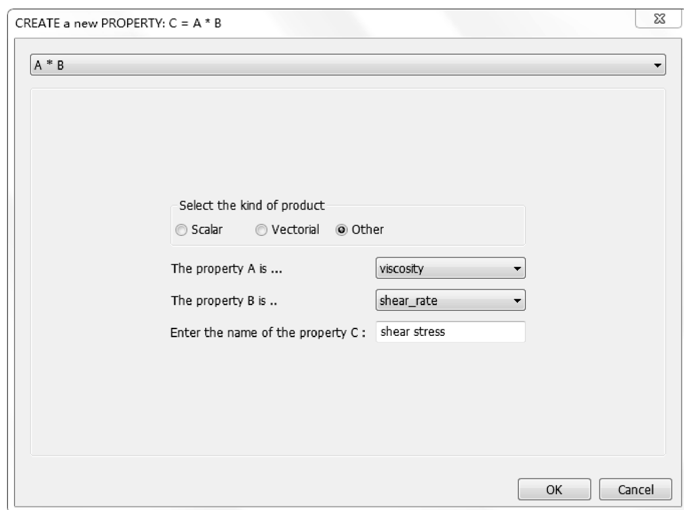
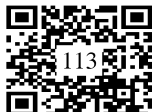


图 4-77　建立剪切应力（设定后的状态）

最后，定义最大剪切应力属性。最大剪切应力定义为示踪粒子从进入流体区域到离开流体区域过程中所经历剪切应力的最大值。在图 4-78 所示的创建新属性对话框中，选择 Min / Max 类型。设置属性为 shear_stress，时间范围从 0 到离开流体区域时间（t_end），取最大值（MAX），命名为 max_shear stress。这样便建立了最大剪切应力属性，用于后续的统计分析。



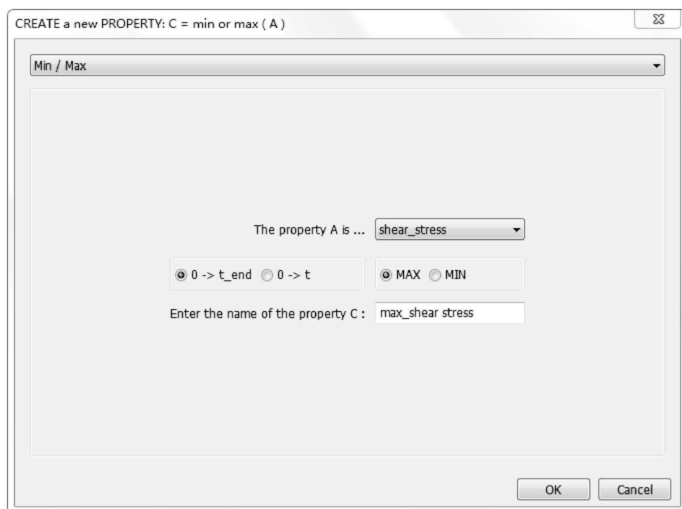


图 4-78　建立最大剪切应力（设定后的状态）

（2）最大剪切应力的概率函数及概率密度函数

单击 Polystat 窗口内 Statistics 菜单中的 Create a new function（创建新函数）命令，打开如图 4-79 所示的创建函数对话框。在函数类型列表中选择 Probability Function（概率函数）选项。切片组设置为 exit，属性设置为 max_shear stress。无须选择速度场，且不考虑权重。计算得到的最大剪切应力概率分布曲线上包括 100 个数据点，函数命名为 P_maxSS。单击 OK 按钮，关闭对话框。

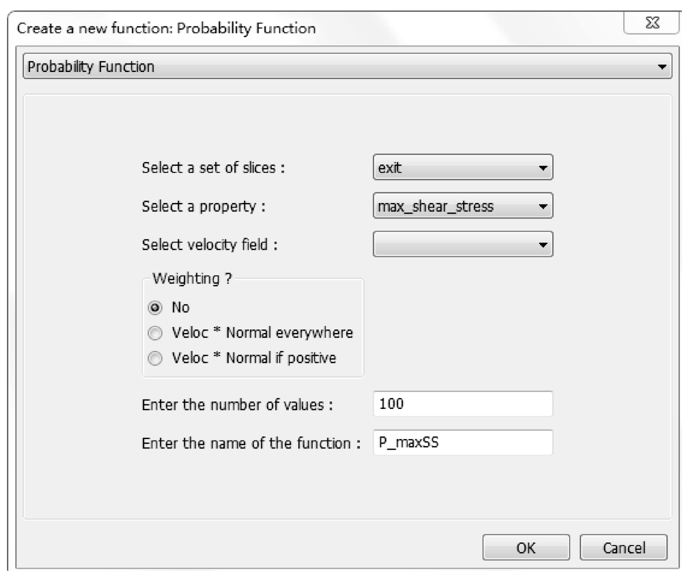


图 4-79　创建函数对话框-最大剪切应力概率函数（设定后的状态）

单击 Polystat 窗口内 Statistics 菜单中的 Create a new function 命令，打开如图 4-80 所示的创建函数对话框。在函数类型列表中选择 Density of Probability Function（概率密度函数）选



项。该曲线中含有点数初定为 100 个，函数命名为 D_maxSS。单击 OK 按钮，关闭对话框。

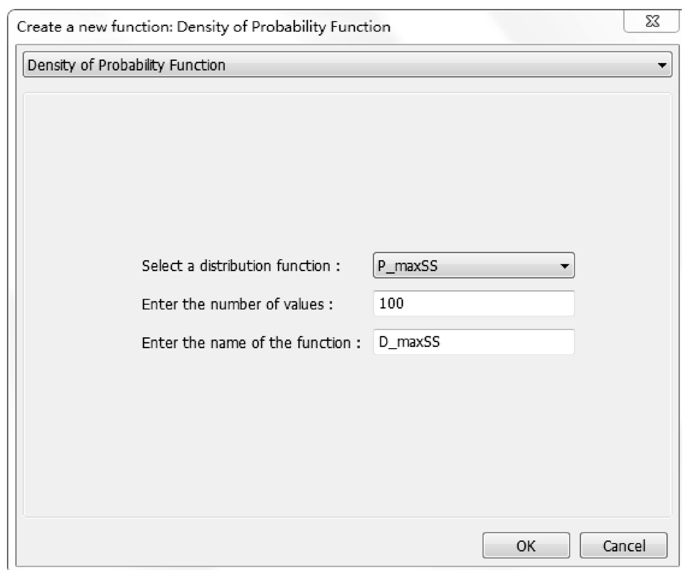


图 4-80　创建函数对话框-最大剪切应力概率密度函数（设定后的状态）

（3）结果显示与存储

运行设定后，通过 Draws stats 命令绘制如图 4-81 和图 4-82 所示的最大剪切应力概率函数曲线和概率密度函数曲线。通过 Write Stats 命令存储这两条曲线，获得 CRV 类型文件。

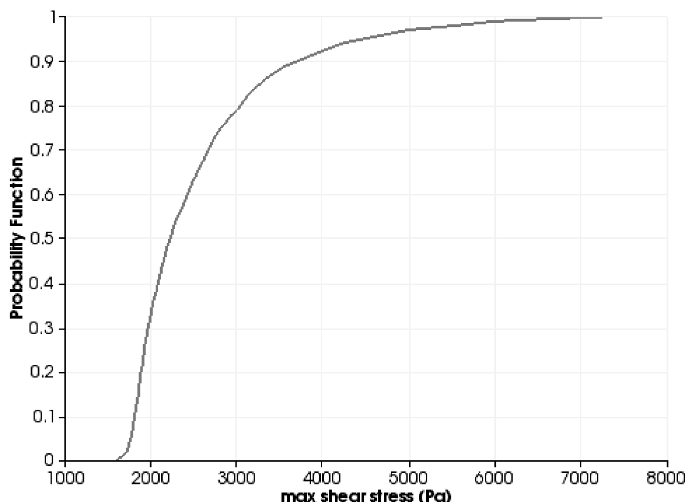


图 4-81　最大剪切应力概率函数曲线

在 Polystat 窗口内单击 File 菜单中的 Save 命令，将当前 Polystat 的相关设定以 . sav 格式的文件进行存储，方便下次使用时直接调用。



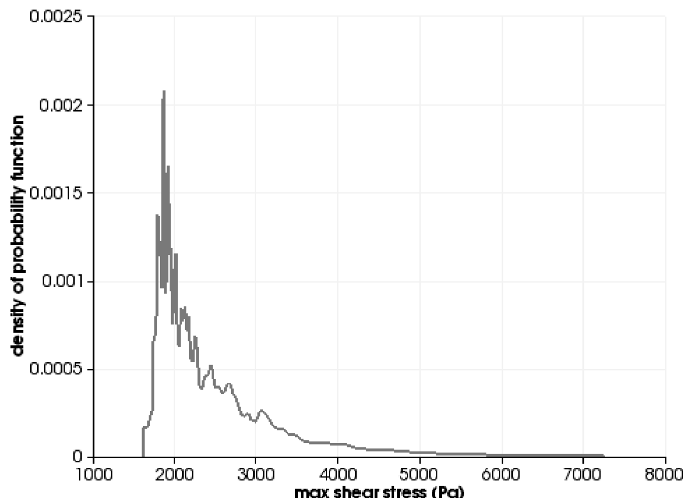


图 4-82　最大剪切应力概率密度函数曲线

2. 少组分粒径分布

下面讨论少组分的在聚合物基体内的粒径分布㊀。入口布置的团聚体初始粒径范围满足300～500μm之间的正态分布。以炭黑N234在聚合物基体内的粒径变化为例，有两种作用方式将导致其粒径减小，即熔蚀和破碎。下面分析这些示踪粒子从出口离开计算区域时的粒径分布。

在熔蚀过程中，微小颗粒从少组分团聚体上剥落下来。熔蚀发送的条件是团聚体承受的剪切应力大于熔蚀临界剪切应力。在这种情况下，如假定团聚体为球体，且剥落后仍为球体，那么在承受剪切时间后，粒径的变化量可表示为

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = -\frac{8\alpha(\sigma - \sigma_c^e)\dot{\gamma}}{3S^2} \tag{4-3}$$

式中，α为比例系数；$\dot{\gamma}$为剪切速率，单位为s^{-1}；S为t时刻的粒径，单位为μm；$\Delta S + S$为$\Delta t + t$时刻的粒径，单位为μm㊁。炭黑N234的$\sigma_c^e = 71400\text{Pa}$，系数$\alpha = 0.0000178\ \mu\text{m}^3/\text{Pa}$。

破碎过程中，当少组分团聚体在经历的剪切应力大于破碎临界剪切应力㊂，且承受应力的时间达到一定长度时，将有一定比例的团聚体会发生破碎：

$$\sigma_c^r = \sigma_{\min} + \frac{\beta}{S} \tag{4-4}$$

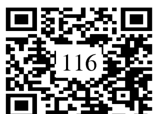
式中，针对炭黑N234的$\sigma_{\min} = 23227\text{Pa}$，系数$\beta = 6628460\text{Pa}/\mu\text{m}$。

（1）定义破碎属性

㊀ 值得注意的是，在Polyflow流场模拟中，只是计算得到了纯流体的流场特征。这里讨论的问题就是假设将少组分粒子加入到特定剪切流场内，流场对其施加剪切作用，从而发生少组分的粒径变化，但是少组分的加入对流场的影响将被忽略。

㊁ 熔蚀是粒径减小的过程，所以ΔS为负。

㊂ 破碎临界剪切应力与粒径有关，不同粒径对应不同的临界剪切应力。



打开 Polystat 窗口后，单击 Properties 菜单中的 new disagglomeration properties 命令，在打开的创建新属性对话框的下拉列表框中选择 Disagglomeration 选项（见图 4-83）。

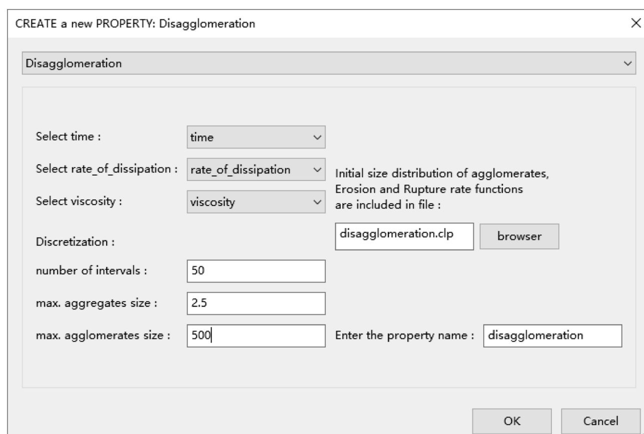


图 4-83　破碎属性设定页面（设定后的状态）

图 4-83 所示的页面中，要选取时间 time、耗散速率 rate_of_dissipation 和黏度 viscosity。这三组数据来自于数值计算流场设定部分。除此之外，还要设定破碎后最大微粒粒径 max. aggregates size，取值为 2. 5μm；设定团聚体最大粒径 max. agglomerates size，取值为 500μm。破碎后，最大微粒将形成团聚体最小单元，破碎过程中其粒径不会再减小。为了绘制曲线，还要给出在该粒径范围内提取数据的个数，即设置 number of intervals 为 50。此外，还要选择进行少组分粒径变化时所需的过程控制文件 disagglomeration. clp⊖。

（2）定义出口切片

与 4. 2. 4 节一样，单击 Slices 菜单中的 Automatic slicing 命令，进行出口切片设定。

（3）平均粒径的统计分析

单击 Polystat 窗口内 Statistics 菜单中的 New disagglomation function（创建函数）命令，打开如图 4-84 所示的创建函数对话框。在函数类型列表中选择 Mean disagglomeration function（概率函数）选项。切片组设置为 time，破碎选项设置为 disagglomeration，统计类型设置为 Mean（平均值）。函数命名为 disagglo_function。单击 OK 按钮，关闭对话框。

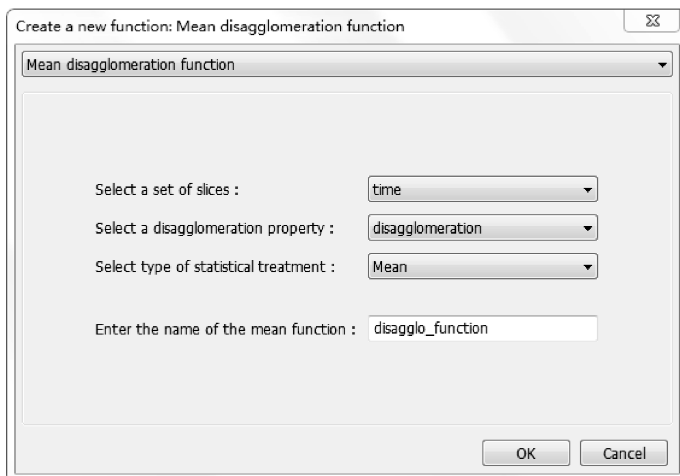


图 4-84　创建函数对话框-破碎函数设定

单击 File 菜单中的 Run 命令运行计算。然后，通过 Draws stats

⊖　disagglomeration. clp 文件中给出了流场内少组分粒径变化所需的相关参数，可通过扫描本页二维码下载。



命令，观察从出口离开计算区域的少组分的粒径分布曲线。图 4-85 中，曲线 1 为入口初始状态下的少组分的粒径分布状态（300 ~ 500μm 的正态分布），曲线 2 为从出口离开流体区域时少组分的粒径分布。

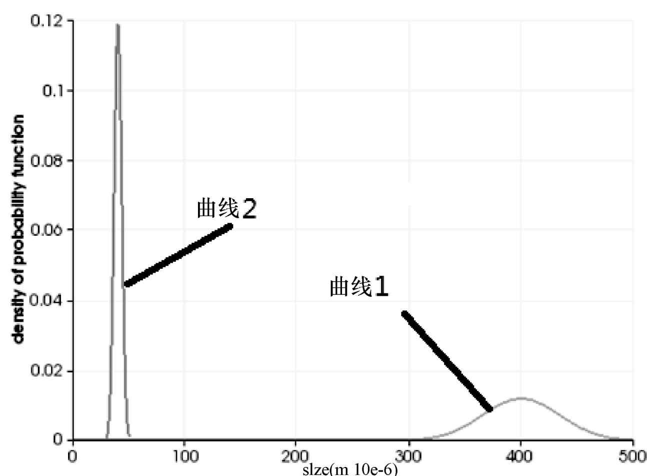


图 4-85　少组分的粒径分布

在 Polystat 窗口内单击 File 菜单中的 Save 命令，将当前 Polystat 的相关设定以 . sav 格式的文件进行存储，方便下次使用时直接调用。

思　考　题

在第 3 章 60r/min、90r/min 和 120r/min 流场计算的基础上，对混合性能进行量化统计。分析转速对停留时间分布、分布指数、分离尺度、示踪粒子经历的最大剪切应力以及加工后少组分团聚体粒径分布的影响。





提 高 篇



第 5 章 双螺杆挤出非等温问题求解

在前面章节的基础上，我们继续讨论双螺杆挤出中的非等温流动问题。本章中假定物料黏度与剪切速率和温度均有关系，这样计算问题的非线性更强，计算收敛难度增加。为了解决这一问题，本章从边界条件、演变算法和给定初始计算结果等几个方面来进行设定。

5.1　物性参数与边界条件

5.1.1　几何模型

为了防止螺杆元件端面对流体区域端面传热和速度计算的影响，本章中使用了如图 5-1 所示的几何模型。螺纹元件长度为 25mm，流体区域长度为 31mm，在流体区域出口和入口均留有长度为 3mm 的非重叠区域。

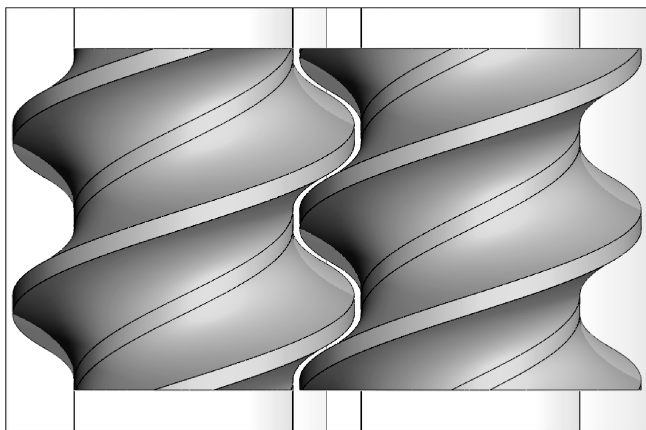


图 5-1　几何模型

5.1.2　网格划分

与此同时，为了减少本章计算实例所消耗的计算资源，非等温计算使用的网格文件中网格数量较等温问题网格有所降低。流体部分网格圆周方向、径向和轴向线网格分段数分别为 60、8 和 31。其中，圆周方向网格在 C 形区分段数为 36、啮合区分段数为 24。端面网格如

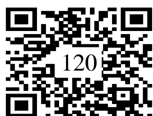


图 5-2 所示[㊀]。流体区域和螺杆区域组合后的网格文件命名为 TSE_mesh31C. msh[㊁]。

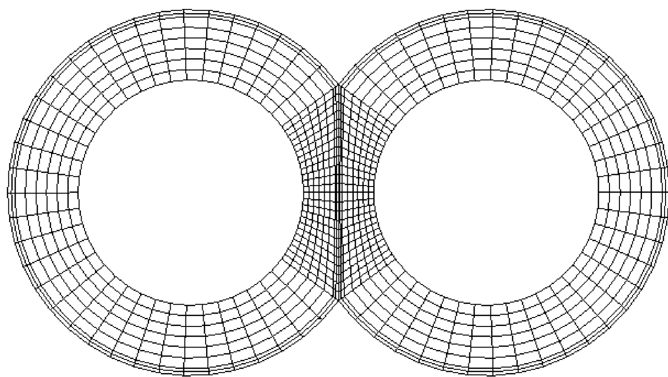


图 5-2　非等温问题中流体区域模型端面网格划分

5.1.3　边界条件

1. 速度边界条件

出口给定法向力和切向力，其中法向力数值采用演变算法，数值由 0 增加到 0.3MPa，切向力为零；入口法向力和切向力均为零；左右孔边界，角速度按照 60r/min 折算为 6.2832rad/s（根据旋转方向该数值应为负）；机筒壁壁面无滑移，法向速度和切向速度均为零。

2. 热边界条件

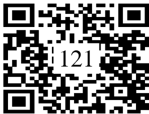
对于像螺杆挤出这样的仿真实例，由于螺杆的转动和出口压力的作用，在其入口和出口边界上，同时存在进入流体区域和离开流体区域的速度分量，即存在一定的回流节点（节点速度 Z 向分量与挤出方向相反）。本章中，在入口和出口边界上对比两种边界条件的计算情况。第一种是在这两个面上施加进入流体区域流体温度的边界条件。在该边界条件中，当其速度方向为离开流体区域的方向时，其温度不受限制，而当其速度方向为流入流体区域的方向时，需要给定节点温度。在第二种边界条件中，入口为给定温度边界条件，出口为 Outflow 条件，节点温度由计算获得。热边界条件具体情况见表 5-1。

表 5-1　热边界条件对比

边界名称	方法一	方法二
入口	流入计算区域流体温度边界条件 $T=180℃$	施加温度边界 $T=180℃$
出口	流入计算区域流体温度边界条件 $T=180℃$	Outflow
左孔	给定热流密度 200W/（m^2.K）	给定热流密度 200W/（m^2.K）
右孔	给定热流密度 200W/（m^2.K）	给定热流密度 200W/（m^2.K）
机筒壁面	给定温度 $T=180℃$	给定温度 $T=180℃$

㊀ 图 5-2 中圆周方向啮合区中网格密度相对增加。在前述章节中，C 形区和啮合区中网格密度基本一致，但是对于非等温问题来说，啮合区内的非线性特征更强，需要加大啮合区的网格密度，提高局部计算精度，以促进计算收敛。

㊁ 本章使用流体网格数量较前述章节有所降低，目的是提高计算速度，降低内存消耗。但是由于网格数量降低，因此计算精度会有所下降。



5.1.4 物性参数

本章中，物料的黏度与剪切速率和温度有关。使用 Bird-Carreau 模型来描述物料黏度和剪切速率之间的关系：

$$\eta_{bc}(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})(1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}} \tag{5-1}$$

式中，η_0 为零切黏度，取值为 1000Pa · s；η_{∞} 为无穷大剪切速率下的黏度，取值为 0Pa · s；λ 为松弛时间，取值为 1s；n 为幂率指数，取值为 0.4（无量纲）；$\dot{\gamma}$ 为剪切速率，单位为 1/s；$\eta_{bc}(\dot{\gamma})$为物料黏度，单位为 Pa · s。

另外，在此基础上，使用近似 Arrhenius 定律来进行黏度的温度修正：

$$h(T) = \exp[-\alpha(T - T_{\alpha})] \tag{5-2}$$

式中，α 为温度系数，取值为 0.0025℃$^{-1}$；T_{α} 为参考温度，取值为 453.15K。

计算中，物料黏度可表示为

$$\eta = \eta_{bc}(\dot{\gamma})h(T) \tag{5-3}$$

另外，物料密度 ρ 为 900kg/m^3，导热系数 K 为 0.207W/（m · K），比热容 c_V 为 1860J/(kg · K)。螺杆元件材料的相关参数为：密度 7870kg/m^3、导热系数 40W/(m · K)、比热容 400J/(kg · K)。

5.2 非等温流场计算任务的设定

在新建仿真任务 TSE_02_noniso_01 后，将网格文件 TSE_mesh31C.msh 复制到新仿真任务的指定位置，文件树如图 5-3 所示。双击图 5-3 中的 msh 文件，启动如图 5-4 所示的 Polydata 设定页面。

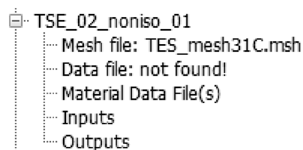


图 5-3 仿真任务文件树

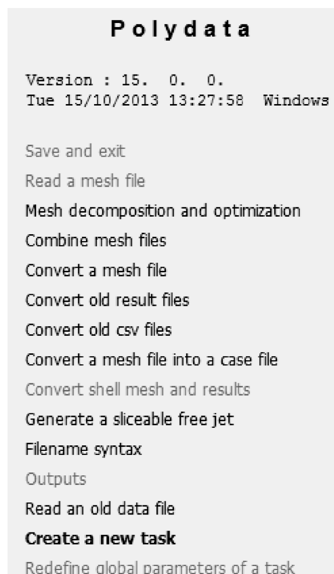
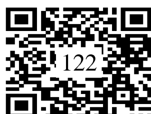


图 5-4 Polydata 设定页面



5.2.1　创建仿真任务

单击图 5-4 中的 Create a new task 选项，进入如图 5-5 所示的 Create a new task（创建新任务）页面，选择 F. E. M. task 和 Evolution problem（s）两个选项。在本例中，出口压力会造成物料反流，故提高了计算问题的非线性强度，这时需要使用演变算法，从小到大逐渐增加出口压力，有利于促进计算收敛。单击 Accept the current setup（接受当前设定）选项，进入有限元任务 1 设定页面（见图 5-6）。

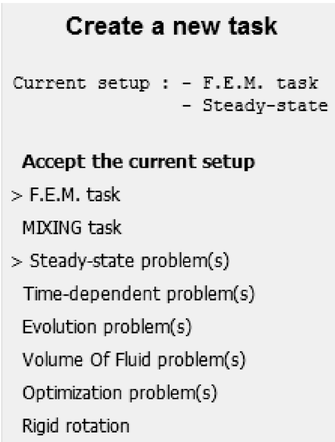


图 5-5　创建新任务页面

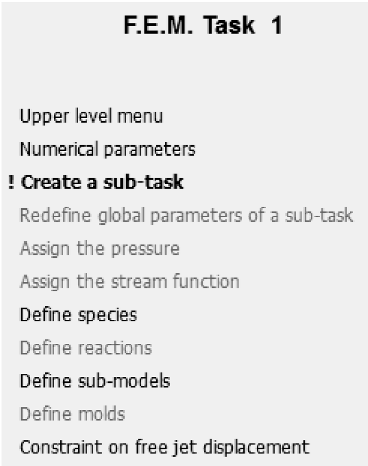


图 5-6　有限元任务 1 设定页面

1. 创建流场温度场计算子任务——广义牛顿非等温流动任务

单击有限元任务 1 设定页面中的! Create a sub-task（创建子任务）选项。进入如图 5-7

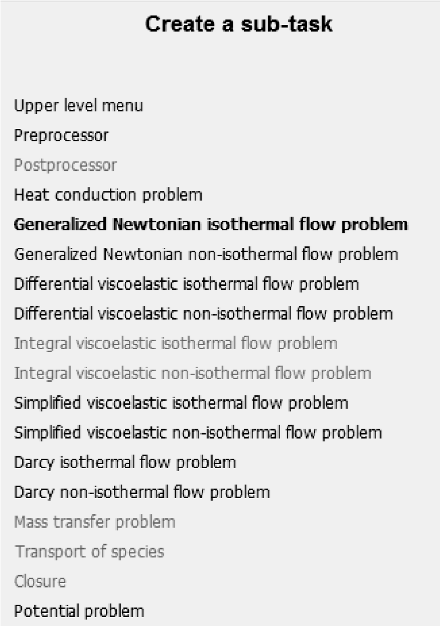
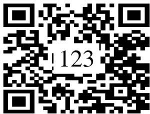


图 5-7　子任务类型选择页面



所示的子任务类型选择页面。选择其中的 Generalized Newtonian non-isothermal flow problem（广义牛顿非等温流动问题）选项，命名为 TES-noniso 后，进入如图 5-8 所示的 TES_noniso 子任务设定页面。

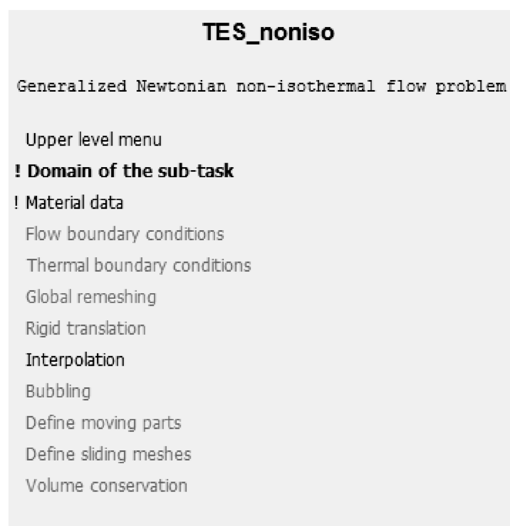


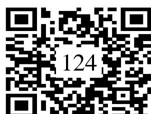
图 5-8　TES_noniso 子任务设定页面

（1）子任务计算区域设定

单击图 5-8 中的! Domain of the sub-task 选项，进入如图 5-9 所示的子任务区域选择页面。页面中出现三个计算区域：Add sdom req 为流体区域、Add sdom re2 和 Add sdom re3 为螺杆元件区域。通过添加或移除操作，将螺杆元件区域从选定窗口移动到待选窗口。设定完成后，单击 Upper level menu 按钮，返回如图 5-8 所示的 TES_noniso 子任务设定页面。



图 5-9　子任务区域选择页面



(2) 物性参数设定

此时，图 5-8 中原本为灰色的几个不可选择的选项均变为黑色的可选选项，并且！Material data（物性参数）选项变为黑色加粗状态。单击该选项，进入如图 5-10 所示的材料物性参数设定页面。

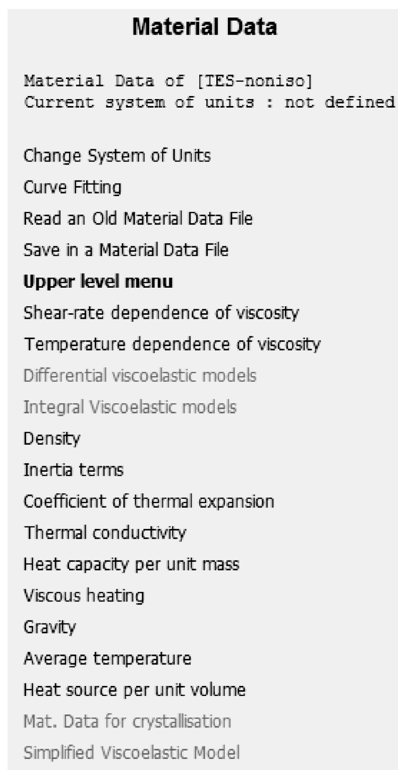


图 5-10　材料物性参数设定页面

1) 单位制。

首先要确认当前的系统单位制，单击图 5-10 中的 Change System of Units（修改系统单位制）选项，进入如图 5-11 所示的单位制设定页面。单击！Define current system of Units（定义当前单位制）选项，进入如图 5-12 所示的当前系统单位制设定页面。从图中可以看出，当前的系统单位为 m-kg-s-K-A 的国际制单位。保持当前设定，单击两次 Upper level menu 选项，返回如图 5-13 所示的材料物性参数设定页面。对比图 5-10 和图 5-13，当前系统单位制（Current System of Units）发生了变化。

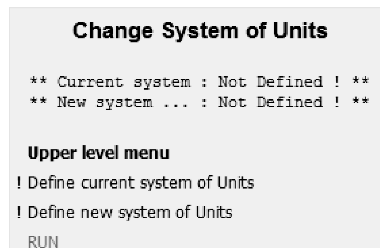


图 5-11　系统单位系设定页面



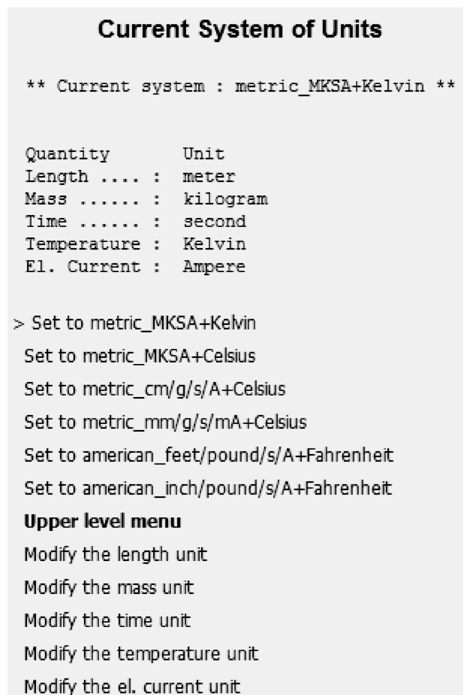


图 5-12　当前系统单位制设定页面

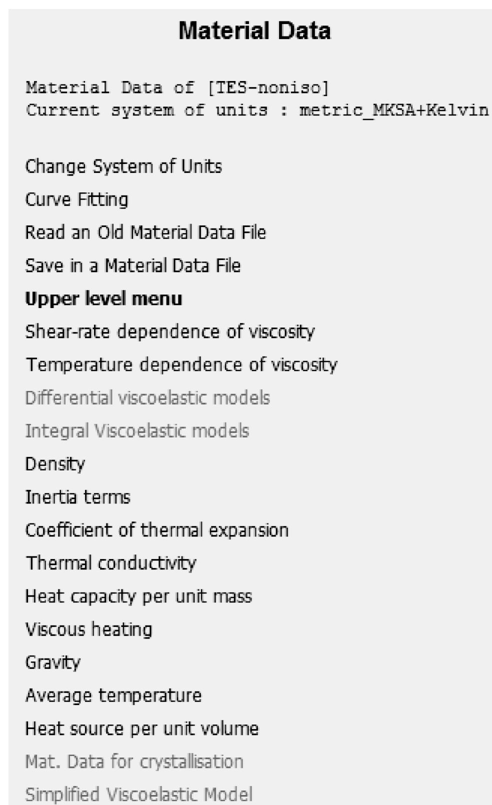


图 5-13　材料物性参数设定页面（设定单位制后）

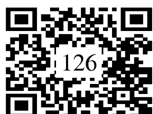
2）与剪切速率有关的黏度参数设定。

单击图 5-13 中的 Shear-rate dependence of viscosity（与剪切速率有关的黏度）选项，进入如图 5-14 所示的与剪切速率有关的黏度设定页面。本例研究的流体属于非牛顿流体，由 Bird-Carreau 本构方程来描述其流变特性，见式（5-1）。单击图 5-14 中的 Bird-Carreau law 选项，进入如图 5-15 所示的 Bird-Carreau 本构方程参数设定页面。在该参数设定页面中，给出了本构方程的表达式，其中各个参数与式（5-1）中各个参数相对应：f（g）对应 $\eta_{bc}(\dot{\gamma})$，fac 对应 η_0（取值为 1000），facinf 对应 η_∞（取值为 0），tnat 对应 λ（取值为 1），expo 对应 n（取值为 0.4），g 对应 $\dot{\gamma}$。完成设定后返回如图 5-13 所示的材料物性参数设定页面，这时系统出现如图 5-16 所示的提示：由于幂率指数 expo 小于 0.75，系统推荐如下三种方法，以便于计算的收敛㊀。

① 推荐使用 Picard iterations 方法进行黏度迭代计算。

② 对幂率指数进行演变算法计算。

㊀ 当幂律指数小于 0.75 时，流动属于非牛顿特性较强的问题，需要使用特殊的方法进行迭代计算。系统中推荐三种算法可促进迭代收敛：第一种使用 Picard 迭代算法进行流体黏度迭代；第二种算法中对幂律指数进行演变计算，计算中幂律指数从 1 开始逐渐减小，将前一步获得的计算结果作为下一步计算迭代的初始条件；第三种算法中对入口流率进行演变计算，计算中，入口流率逐渐增大，与第二种方法一样，也是将前一步获得的计算结果作为下一步计算迭代的初始条件。



③ 对给定流率的边界，流率数值使用演变算法计算。

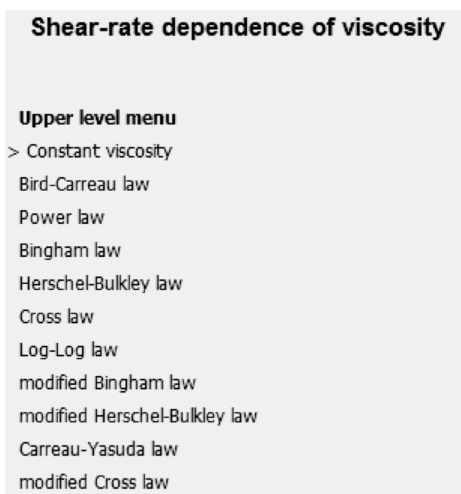


图 5-14　与剪切速率有关的黏度设定页面

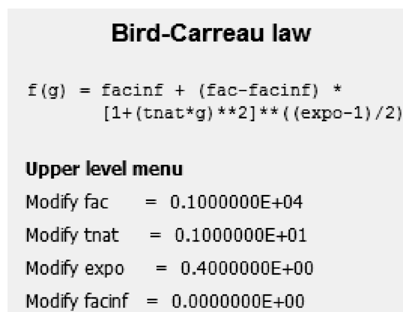


图 5-15　Bird-Carreau 本构方程参数设定页面（设定后的状态）

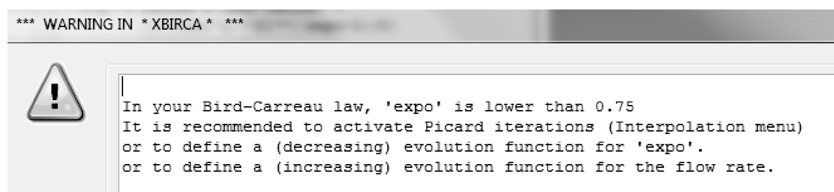


图 5-16　关于幂率指数小于 0. 75 的系统提示

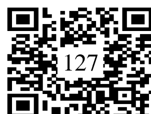
本例中选择第一种方法，在后续内容中设定。确认后返回如图 5-13 所示的材料物性参数设定页面。

3）与温度有关的黏度参数设定。

单击图 5-13 中的 Temperature dependence of viscosity（与温度有关的黏度修正）选项，进入如图 5-17 所示的与温度有关的黏度设定页面。单击其中的 Arrhenius approximate law（近似 Arrhenius 定律）选项，进入如图 5-18 所示的近似 Arrhenius 修正定律参数设定页面，见式（5-2）。页面中的表达式与式（5-2）中的各个参数相对应：$h(T)$ 与 h(t) 相对应；T_α 与 talfa 相对应（取值为 453. 15）；T 与 t 相对应；α 与 alfa 相对应（取值为 0. 0025）。设定后，返回如图 5-13 所示的材料物性参数设定页面。



图 5-17　与温度有关的黏度设定页面（设定后的状态）



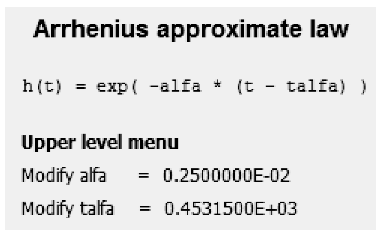


图 5-18　近似 Arrhenius 定律参数设定页面

4）密度。

单击图 5-13 中的 Density（密度）选项，进入如图 5-19 所示的密度设定页面。修改密度取值为 900，单位为 kg/m³。设定后返回如图 5-13 所示的材料物性参数设定页面。

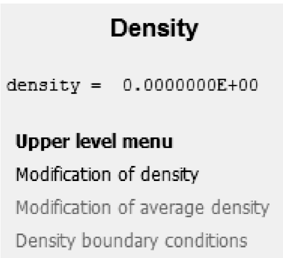


图 5-19　密度设定页面

5）导热系数。

单击图 5-13 中的 Thermal conductivity（导热系数）选项，进入如图 5-20 所示的导热系数设定页面。该页面中，导热系数随温度的变化可以用一个三次多项式描述。本例中认为导热系数与温度无关，所以只需设定页面中方程的参数 a，其取值为 0.207W/(m·K)，其余参数均为 0。设定后返回如图 5-13 所示的材料物性参数设定页面。

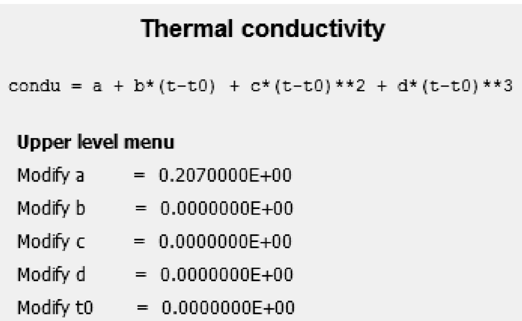


图 5-20　导热系数设定页面（设定后的状态）

6）比热。

单击图 5-13 中的 Heat capacity per unit mass（比热）选项，进入如图 5-21 所示的比热设定页面。该页面中，比热随温度的变化可以用一个三次多项式描述。本例中认为比热与温度无关，所以只需设定页面中方程的参数 a，其取值为 1860J/（kg·K），其余参数均为 0。设定后返回如图 5-13 所示的材料物性参数设定页面。

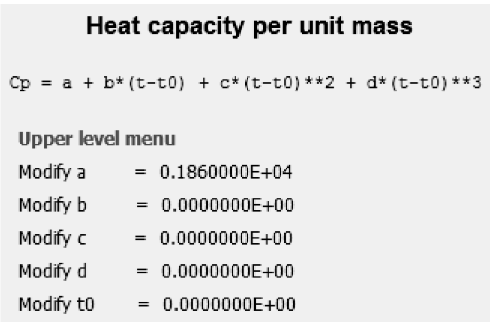


图 5-21　比热设定页面（设定后的状态）

7）黏性热。

单击图 5-13 中的 Viscous heating（黏性热）选项，进入如图 5-22 所示的黏性热设定页面。在



本例中要考虑剪切黏性生热影响，所以选择 Viscous heating will be taken into account 选项，考虑黏性热影响。该页面中还有一个黏性热影响系数选项，即 Modification of scaling factor。该数值默认为 1，表示在计算中黏性生热按照 100% 数值进行考虑。当该数值为 0 时，表示计算中不考虑黏性热生热的影响[⊖]。黏性生热会导致流体温度升高，使得问题的收敛难度增加。本例中针对黏性热影响系数使用演变算法。单击 Polydata 窗口菜单中的 EVOL 按钮，使其处于选定状态。随后单击 Modification of scaling factor 选项，在打开的如图 5-23 所示的对话框中，在 New value 栏中输入 1 后，单击 OK 按钮。随后，进入如图 5-24 所示的演变算法设定页面。选定其中的 f(S) = S 演变算法后，单击页面中的 Modify the evolution parameters（编辑演变参数）选项，进入如图 5-25 所示的演变参数设定页面。为了保证计算能够顺利开始，这里将演变参数 S 的初始值（Initial value of S）设定为一个较低值（即 0.01），上限（Upper limit of S）设定为 1，初始步长（Initial value of delta-S）设定为 0.01，最小步长（Min admissible value of delta-S）设定为 0.0001，最大步长（Max admissible value of delta-S）设定为 0.25[⊜]，每一步允许的最大迭代步数（Max number of successful steps）设定为 20，且保持默认选中迭代算法（Use of the 0-order method for the integration）。计算中实际的黏性热影响系数等于图 5-23 中输入数值与表达式 f(S) 的乘积。设定后返回如图 5-13 所示的材料物性参数设定页面，再次单击 EVOL 按钮，使其处于待选状态。

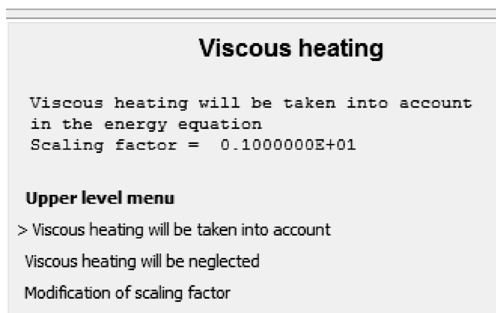


图 5-22　黏性热设定页面（设定后的状态）

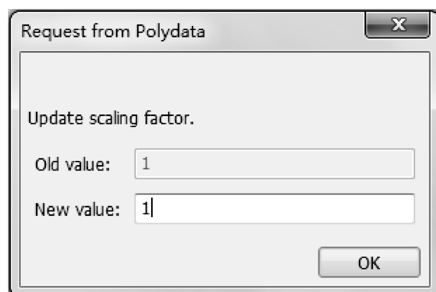
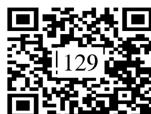


图 5-23　比例系数设定页面

⊖ 对于有些问题，在考虑黏性热后，将变成非线性较强的问题，可以使用演变算法来对黏性热影响系数进行演变，有利于得到收敛结果。

⊜ S 最小步长的取值是 S 演变的停止条件，如果当前步长 S 为 0.1，计算没有收敛，系统则会将 S 步长减半，再次进行计算，如果还是不收敛，则还会对 S 步长减半。当 S 步长小于 S 最小步长时，则系统任务计算失败，将终止计算。当 S 步长减小后，获得了收敛结果，系统将逐渐增加 S 数值，直到其达到 S 最大步长为止。



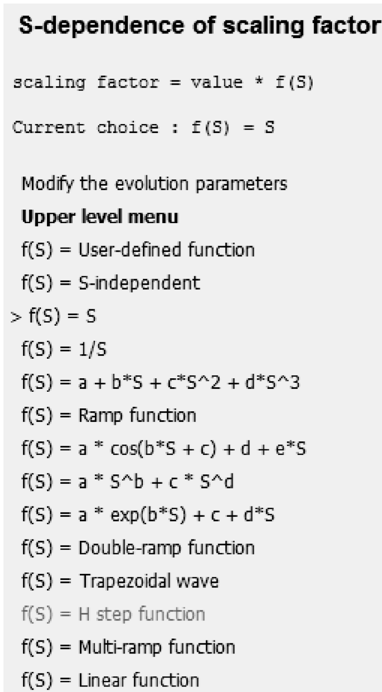


图 5-24　演变算法设定页面

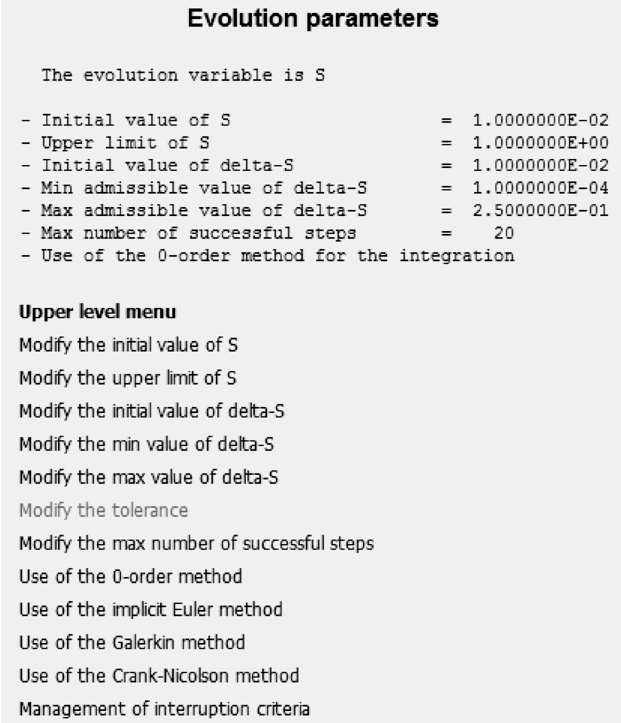


图 5-25　演变参数设定页面

8）惯性选项。

单击图 5-13 中的 Inertia terms（惯性项）选项，进入如图 5-26 所示的惯性项设定页面。由于聚合物加工中黏性应力远远大于彻体力作用，因此可以忽略惯性的影响。所以这里选择 Inertia will be neglected（忽略惯性）选项。设定后返回如图 5-13 所示的材料物性参数设定页面。

9）初始温度。

在非等温计算中，流体区域的初始温度是迭代的初始条件。在材料物性参数设定页面中，单击 Average temperature（平均温度）选项，进入如图 5-27 所示的区域初始平均温度设定页面。假设初始时刻，区域各处温度为 453. 15K。

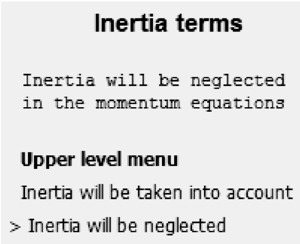


图 5-26　惯性项设定页面（设定后的状态）

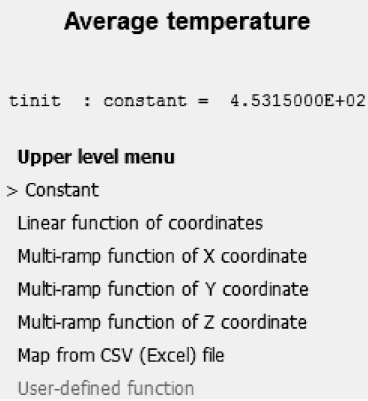
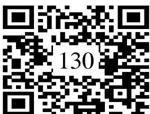


图 5-27　区域初始平均温度设定页面（设定后的状态）



完成物性参数设定后，返回如图 5-8 所示的 TES_noniso 子任务设定页面。对比前后，图 5-8 中多个选项从原来的灰色不可选状态转变为黑色可选状态。

（3）流动边界条件的设定

在图 5-8 中单击！Flow boundary conditions（流动边界条件）选项，进入流动边界条件设定页面（见图 5-28）。为了区分入口和出口，在 Polydata 窗口的 Graphcial Window 下拉菜单中选择 Axes 选项的 show axes 选项，在图形窗口中打开坐标轴，如图 5-29 所示。沿 Z 轴方向即为挤出方向。

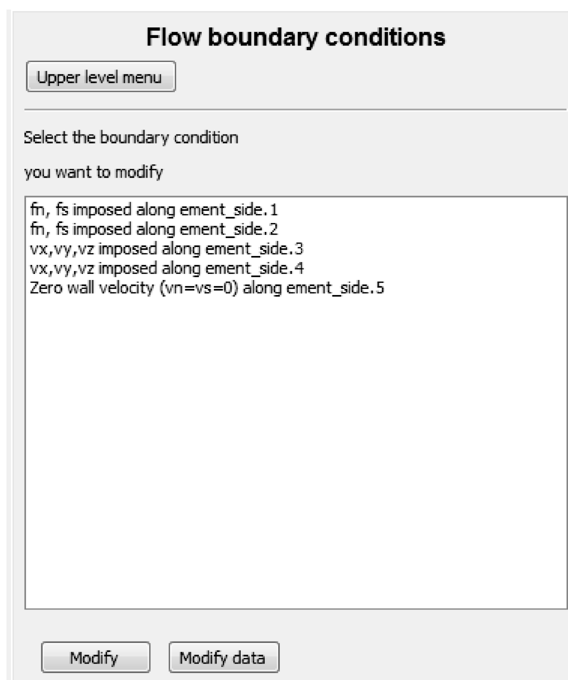


图 5-28　流动边界条件设定页面（设定后的状态）

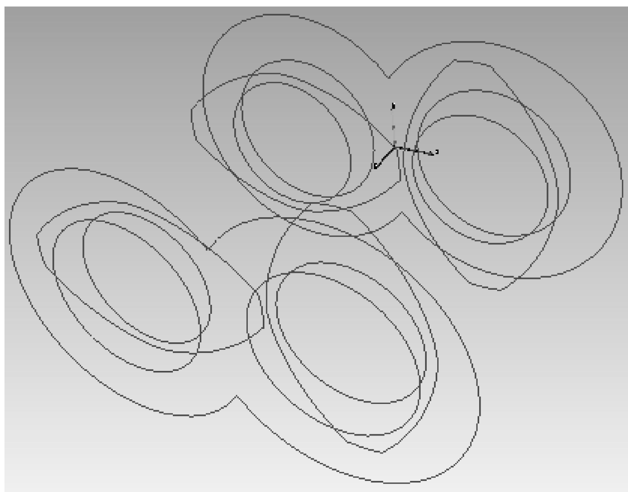


图 5-29　坐标轴



1）入口边界。

选择入口边界，单击 Modify 按钮，在打开的如图 5-30 所示的边界条件类型页面中，选择 Normal and tangential forces imposed（fn，fs）（施加法向和切向力）选项，并将 fn 和 fs 均赋值为 0。这样的边界条件说明流体区域入口的流体为自由流动。

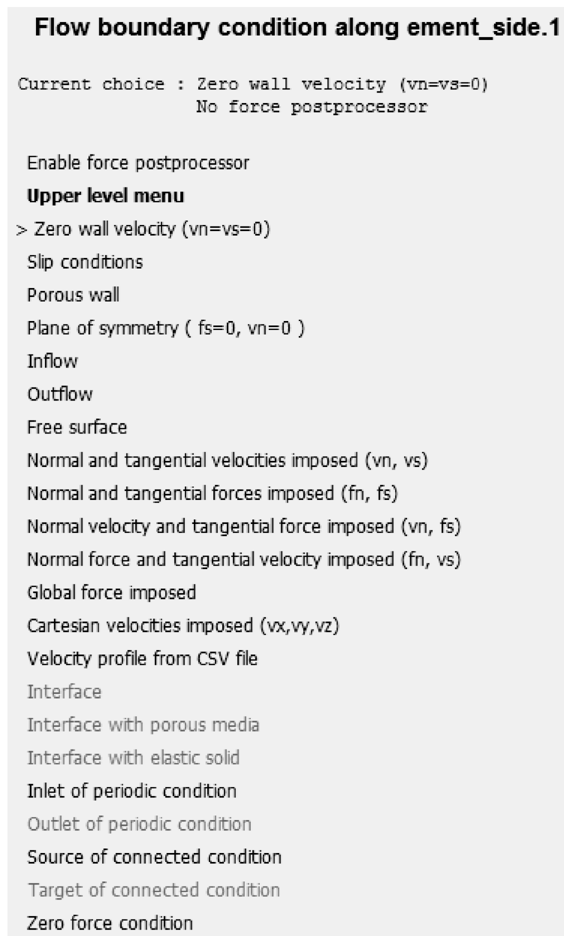
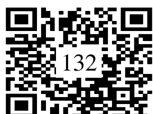


图 5-30　边界条件类型页面

2）出口边界。

同样，在出口边界也设定 Normal and tangential forces imposed（fn，fs）类型的边界条件。施加 30000Pa 法向应力，作为背压。由于背压的作用，流体反流强度增加，增加了迭代难度。因此，对 fn 进行演变处理。当进入如图 5-31 所示的 fn，fs imposed along ement_side. 2（沿着边界 2 施加法向力和切向力的设定）页面后，在单击 Constant 选项之前，单击 Polydata 窗口中的 EVOL 按钮，使其处于选定状态，然后再单击 Constant 选项，输入数值 300000（单位为 Pa）后，单击 Upper level menu 选项，进入如图 5-32 所示的 fn 演变方程选择页面，单击 f(S) = S 选项。计算中实际的 fn 等于输入数值 300000 与表达式 f(S)的乘积。为此，需要设定 S 的取值范围和变化参数。单击图 5-32 中的 Modify the evolution parameters（编辑演变参数）选项，进入如图 5-33 所示的演变参数设定页面。由于 S 的取值已经在前述内容中完



成设置，故这里不再修改。初始 S 等于 0.01，初始步长 δS 也等于 0.01，这样，计算开始时出口压力的取值为 600Pa。单击图 5-33 中 Upper level menu 选项，返回图 5-32 所示的 fn 演变方程选择页面，并继续返回图 5-34 所示的切向力 fs 设定页面。此时，再次单击 EVOL 按钮，关闭法向力 fn 的演变设定。单击图 5-34 中的 Upper level menu 选项，完成出口边界条件的设定，返回如图 5-28 所示的流动边界条件设定页面。

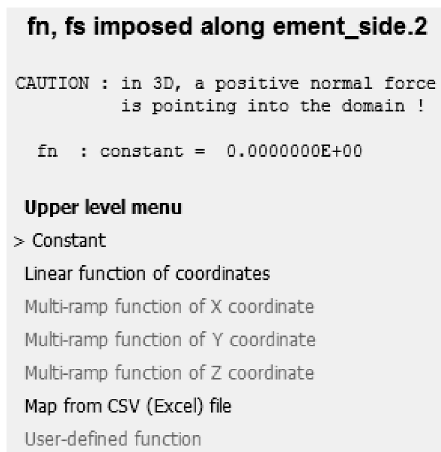


图 5-31　沿着边界 2 施加法向力和切向力的设定页面

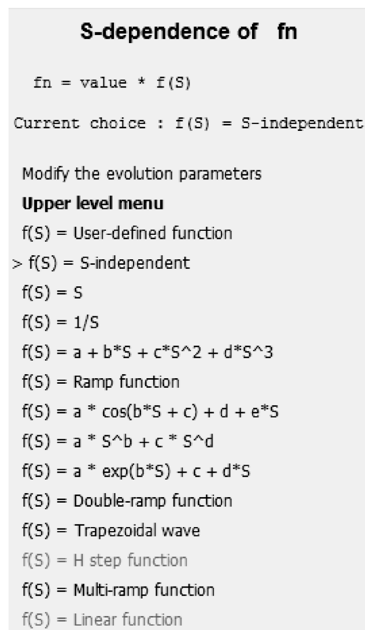


图 5-32　fn 演变方程选择页面

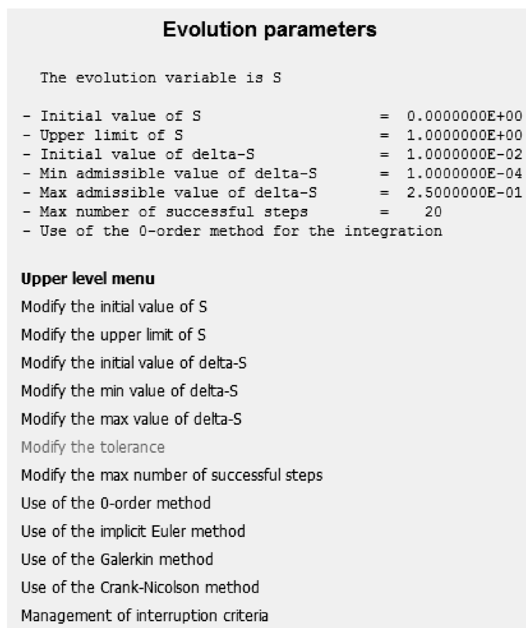


图 5-33　演变参数设定页面

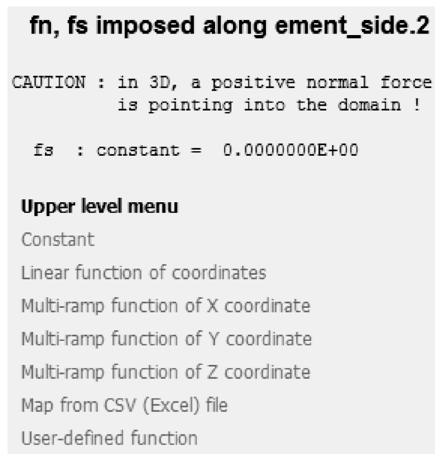


图 5-34　切向力 fs 设定页面



3）左右孔边界。

对于左右两个内孔，设定与螺杆转速一致的边界条件。在边界3条件类型选择页面（见图5-35）中选择Cartesian velocities imposed（vx，vy，vz）（施加笛卡尔坐标系速度）选项，在相应的参数设定页面（见图5-36）中需设定构成X轴正向位置孔旋转轴线的两个点(0.0105,0,0）和（0.0105,0,1)、转动角速度所对应的－6.2832rad/s数值以及平移速度(均为零)[1]。对于X轴负向位置孔来说，构成旋转轴线的两个点为（－0.0105,0,0）和(－0.0105,0,1)，其他参数与前一个边界保持一致[2]。

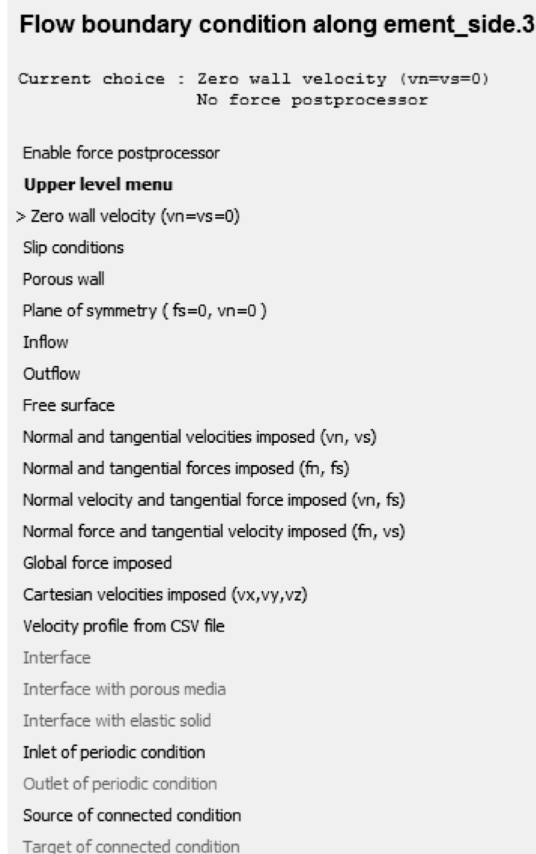


图5-35　边界3条件类型选择页面

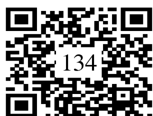
4）机筒内壁边界。

机筒内壁边界满足壁面无滑移的假设，所以该面上法向速度vn和切向速度vs均为0。所选定的边界类型为Normal and tangential velocities imposed。

---

[1] 螺杆转速为负值的原因是，该转速的转动方向与该计算所在坐标系对应的右手定则所确定的正方向相反。

[2] 在第3章中，在这两个边界条件中给定了vn＝fs＝0的滑动边界条件。本例中，由于流体区域长度比螺杆元件长度长，因此这两个边界在出口和入口位置没有被螺杆元件重叠。如果还设定vn＝fs＝0的条件，则没有重叠位置的圆周转速为零，速度分布失真。当然，目前的几何模型也存在一定的失真情况。数值计算应该在适当简化和假设的情况下进行近似计算，是否失真与求解关注点有关，尚需反复斟酌。



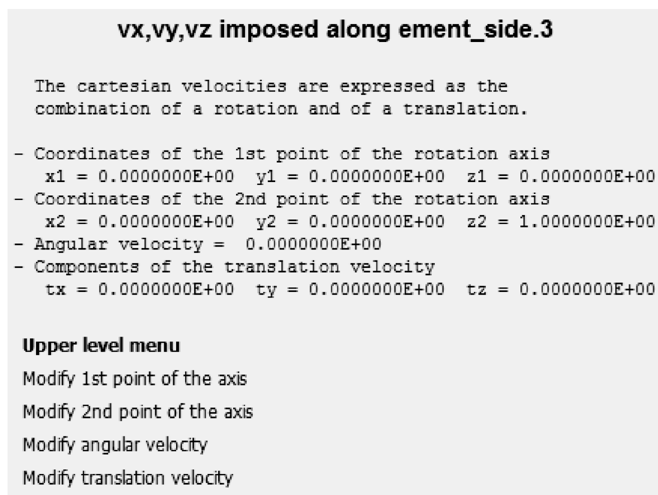


图 5-36　边界 3 笛卡尔速度设定页面

完成流动边界条件的设定后，返回如图 5-8 所示的 TES_noniso 子任务设定页面。

（4）温度边界条件的设定

在图 5-8 中单击！Thermal boundary conditions（热边界条件）选项，进入如图 5-37 所示的热边界条件设定页面。

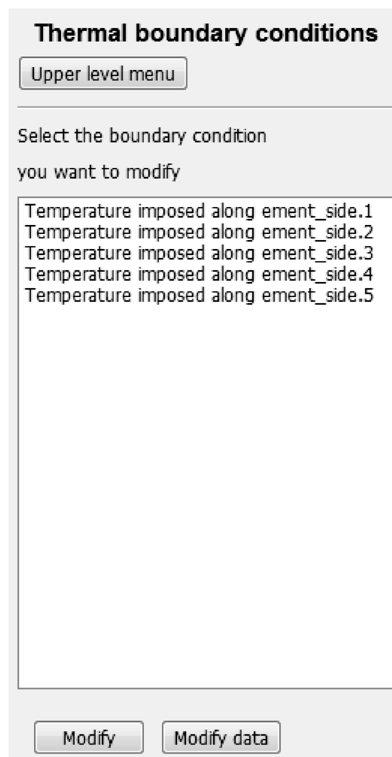
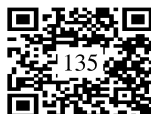


图 5-37　热边界条件设定页面



1）出口、入口条件（给定流入计算区域流体温度边界条件）。

根据坐标轴方向区分入口和出口边界，选中列表中的入口边界 ement_side. 1 后单击 Modify（编辑）按钮，进入如图 5-38 所示的热边界条件类型选择页面。单击其中的 Incoming fluid temperature（流入计算区域流体温度）选项，进入如图 5-39 所示的入口边界流入计算区域流体温度边界条件设定页面㊀。在该页面中，为入口设定流入计算区域流体温度为 453. 15K，最小法向速度为 1×10^{-6}m/s，罚系数为 10^{10}㊁。此外，出口设定流入计算区域流体温度为 473. 15K，最小法向速度为 1×10^{-6}m/s，罚系数为 10^{10}，如图 5-40 所示。

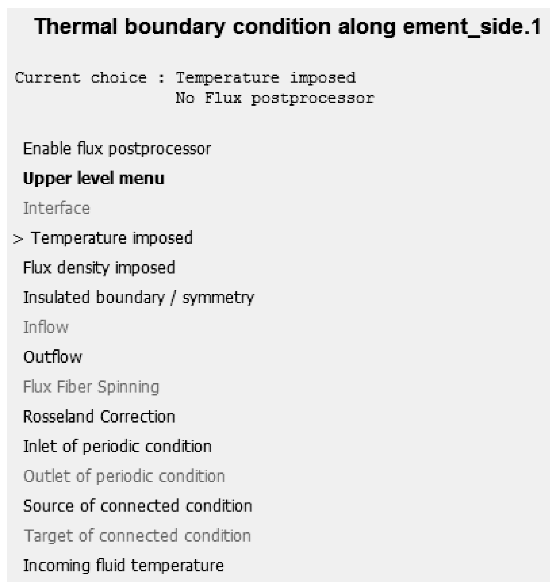


图 5-38　热边界条件类型选择页面

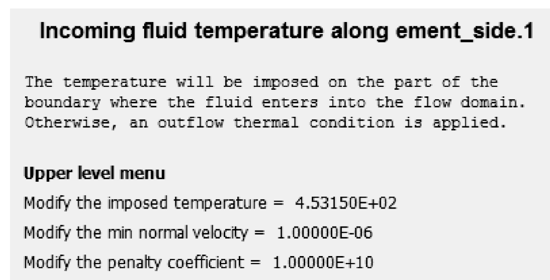


图 5-39　入口边界流入计算区域流体温度边界条件设定页面（设定后的状态）

㊀ 使用该类型的边界条件需要设定三个参数：流入计算区域流体温度、最小法向速度和罚系数。其中，流入计算区域流体温度是指从入口和出口流入流体区域的流体温度；最小法向速度是指如果流动方向是指向流体区域内部且其大小大于该设定值，则在该节点处施加流入计算区域流体温度边界条件；罚系数是使用该类边界条件时为了求解方程所引入的系数。当罚系数的数值过小时，方程求解得到的数值可能与实际情况相差较大，而当罚系数的数值过大时，方程则变成病态方程，不利于求解。

㊁ 除了给定流入计算区域流体温度条件外，为了进行对比，本例中还使用另外一种边界条件对入口和出口温度边界进行设定。其中，入口给定温度，出口使用 Outflow 类型自由流动边界。值得注意的是，这种方法设定温度边界条件会存在一定问题。在入口边界上，流动方向指向流体区域外侧的节点温度应该按照未知数值考虑，而本方法中强制施加温度会造成一定的计算误差。同样，在出口边界，流动方向指向流体区域内的节点，其温度是由外侧区域的温度决定的，而本方法是由计算区域内的温度场决定的，与实际情况存在偏差。



Incoming fluid temperature along ement_side.2

```
The temperature will be imposed on the part of the
boundary where the fluid enters into the flow domain.
Otherwise, an outflow thermal condition is applied.
```

Upper level menu

Modify the imposed temperature = 4.73150E+02

Modify the min normal velocity = 1.00000E-06

Modify the penalty coefficient = 1.00000E+10

图 5-40　出口边界流入计算区域流体温度边界条件设定页面（设定后的状态）

2）左、右孔壁面。

本例中，左、右孔两个边界给定热流密度边界条件。选中其中一个边界后，单击 Modify 按钮，进入如图 5-41 所示的边界 3 热边界条件设定页面。单击其中的 Flux density imposed 选项，进入如图 5-42 所示的热流密度边界条件参数设定页面，其中给出了热流密度 q 与当前表面温度 T 之间的关系式。本例中，热流密度系数 alpha 取值 200W/(m^2・K)，Talpha 取值 323. 15K，其他参数为 0。

Thermal boundary condition along ement_side.3

```
Current choice : Flux density imposed
                 No Flux postprocessor
```

Enable flux postprocessor

Upper level menu

Interface

Temperature imposed

> Flux density imposed

Insulated boundary / symmetry

Inflow

Outflow

Flux Fiber Spinning

Rosseland Correction

Inlet of periodic condition

Outlet of periodic condition

Source of connected condition

Target of connected condition

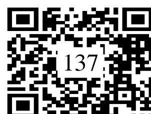
Incoming fluid temperature

图 5-41　边界 3 热边界条件设定页面（设定后的状态）

3）机筒内壁面。

机筒内壁面施加给定温度边界条件，在图 5-37 中选中机筒内部面边界 ement_side. 5 后，单击 Modify 编辑按钮，进入如图 5-43 所示的边界 5 热边界条件设定页面。单击其中的 Temperature imposed 选项，在打开的如图 5-44 所示的给定温度边界条件设定页面中，单击 Constant（常数）选项，并输入数值 473. 15K。

完成热边界条件的设定后，返回如图 5-8 所示的 TES_noniso 子任务设定页面。



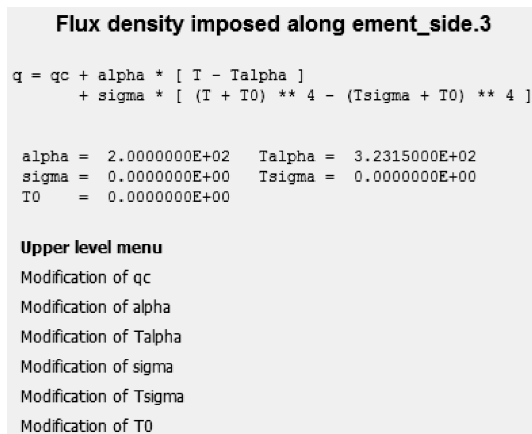


图 5-42　热流密度边界条件参数设定页面（设定后的状态）

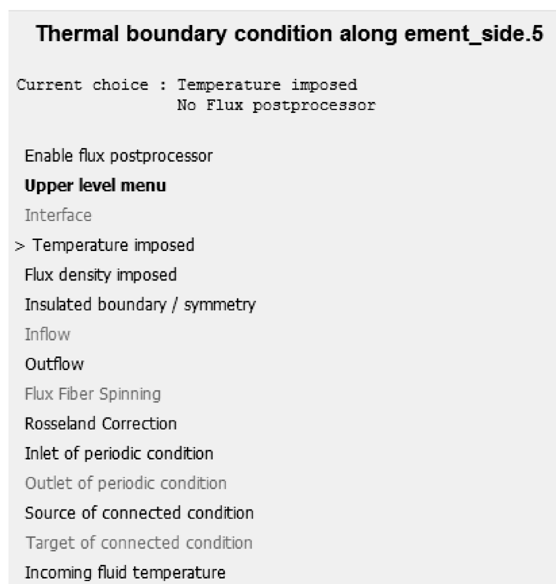


图5-43　边界 5 热边界条件设定页面（设定后的状态）

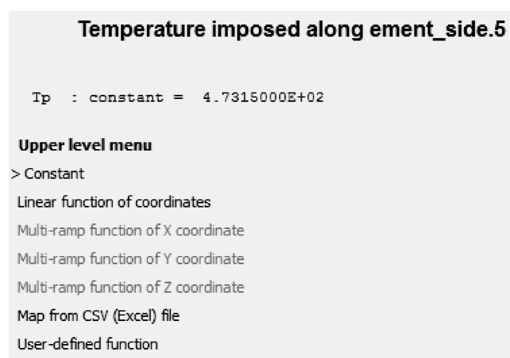


图 5-44　给定温度边界条件设定页面（设定后的状态）



（5）插值设定

单击图 5-8 中的 Interpolation（插值）选项，进入如图 5-45 所示的插值设定页面。这里选择线性单元（Linear coordinates），并且在单元内速度分布满足线性插值关系（Linear velocities）、单元内各处压力相等（constant pressure）、单元内温度满足线性插值关系（Linear element for temperature）。对于能量方程求解，使用迎风算法（Upwinding in energy equation）。对于黏度迭代，使用 Picard 插值算法（Picard iterations on viscosity（g））与图 5-16 所给系统提示相对应。设置后的插值设定页面如图 5-46 所示。完成插值设定后，返回如图 5-8 所示的 TES_noniso 子任务设定页面。

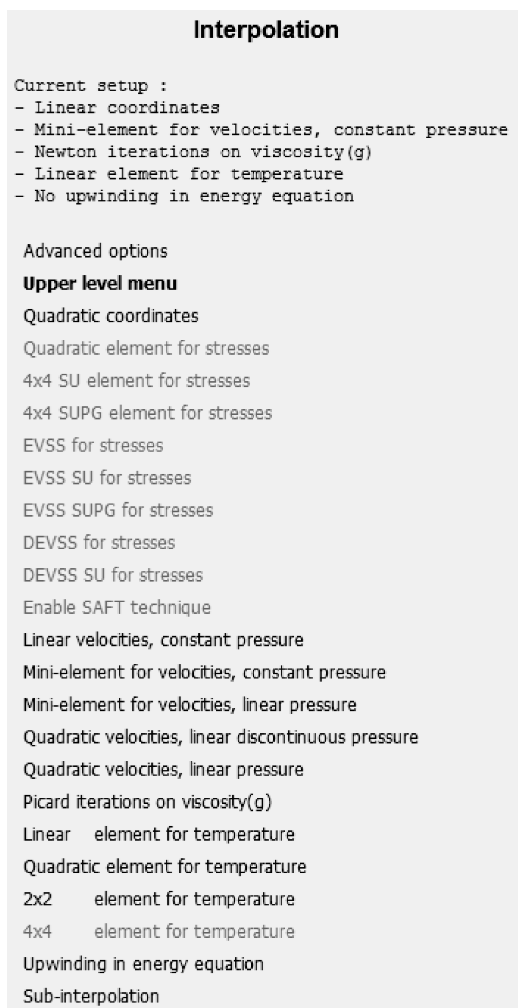


图 5-45　插值设定页面

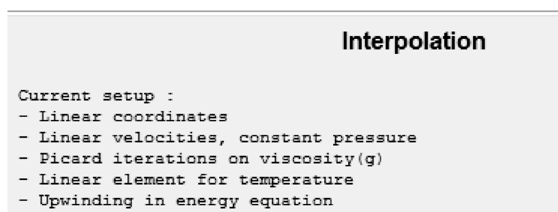
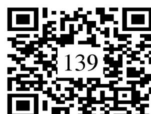


图 5-46　插值设定页面（设定后的状态）



（6）运动部件的设定

单击图5-8中的Define moving parts（定义运动部件）选项，进入如图5-47所示的运动部件设定页面，定义运动部件的运动形式。单击！Creation of a new moving part（创建一个新的运动部件）选项，进入如图5-48所示的运动部件#1设定页面。

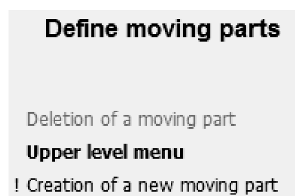


图5-47　运动部件设定页面

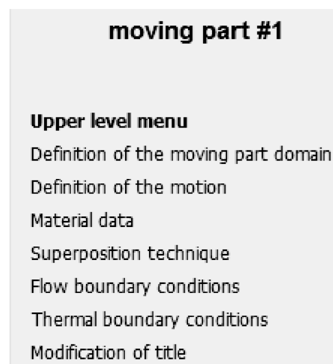


图5-48　运动部件1#设定页面

1）定义运动部件几何体。

单击图5-48中的Definition of the moving part domain选项，进入如图5-49所示的运动部件区域设定页面。将应放置在X轴正向旋转中心位置的螺杆元件（Add sdom re2）从待选区添加到选定区。

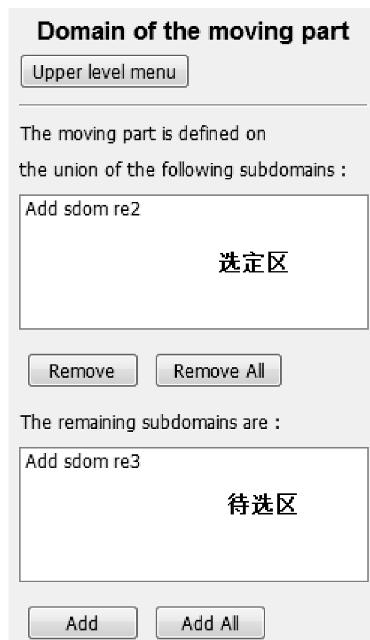
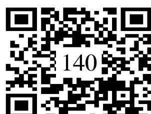


图5-49　运动部件区域设定页面（设定后的状态）

2）定义运动。

单击Upper level menu按钮，返回运动部件#1设定页面（见图5-48），定义运动部件的



运动。单击 Definition of the motion（定义运动）选项，进入如图 5-50 所示的运动形式定义页面。其中运动的定义包括旋转轴原点坐标（the point of local rotation axis）、旋转轴方向（the orientation of local rotation axis）、角速度（the angular velocity）、平移速度（the translation velocity）、初始转角（the initial angle of rotation）、初始平移向量（the initial translation vector）、初始绕 Z 轴转角（the initial theta angle（Z axis））、初始绕 Y 轴转角（the initial phi angle（Y axis））、绕 Z 轴转动角速度（angular velocity Vtheta（Z axis））、绕 Y 轴转动角速度（angular velocity Vphi（Y axis））。本例中定义前三项：旋转轴原点坐标（0.0105,0,0），单位为 m；旋转轴方向（0,0,1）；螺杆转速 -60r/min[⊖]。

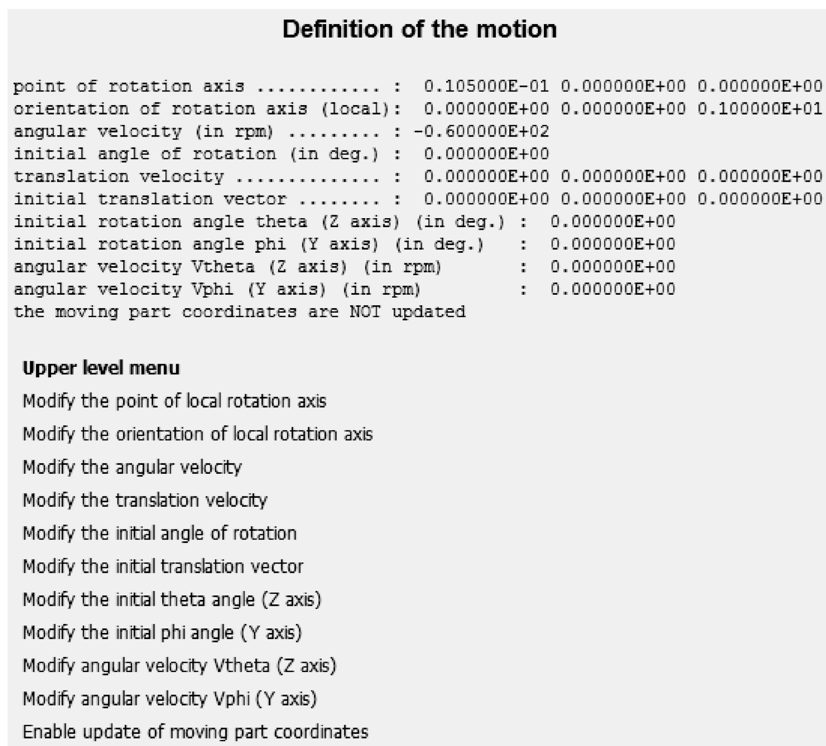


图 5-50　运动形式定义页面（设定后的状态）

3）运动部件物性参数设定。

单击图 5-48 中的 Material data 选项，进入如图 5-51 所示的运动部件物性参数设定页面。单击其中的 Change System of Units 选项，进入如图 5-52 所示的单位设定页面，其中默认选项为 m-kg-s-K-A 国际单位制。保持该选项，确定单位无误后，进行参数设定。

单击 Upper level menu 选项，进入如图 5-53 所示的运动部件物性参数设定页面，对比图 5-51 和图 5-53，可以发现系统单位制发生了变化。在图 5-53 中，设定运动部件密度（Density）为 7870kg/m^3，导热系数（Thermal conductivity）为 40W/(m・K)，比热（Heat capacity per unit mass）为 400J/(kg・K)，且单位体积热源（Heat source per unit volume）为 0。

⊖ 此处螺杆转速的数值要与流体区域内孔的笛卡尔速度相匹配。在设定运动部件转速时要注意系统提示的单位。此处，系统提示单位为 r/min。



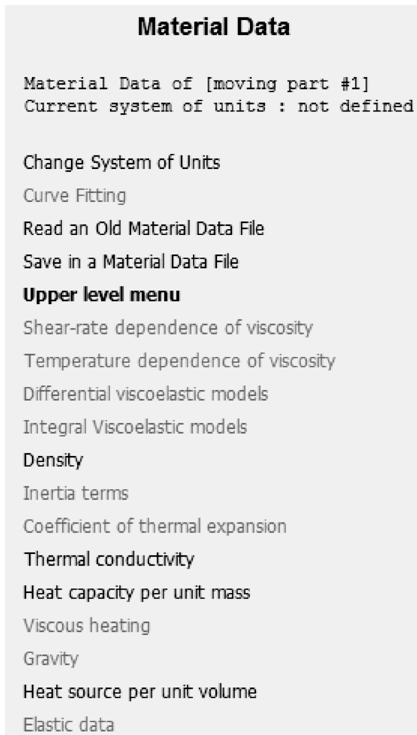


图 5-51　运动部件物性参数设定页面（单位制设定前）

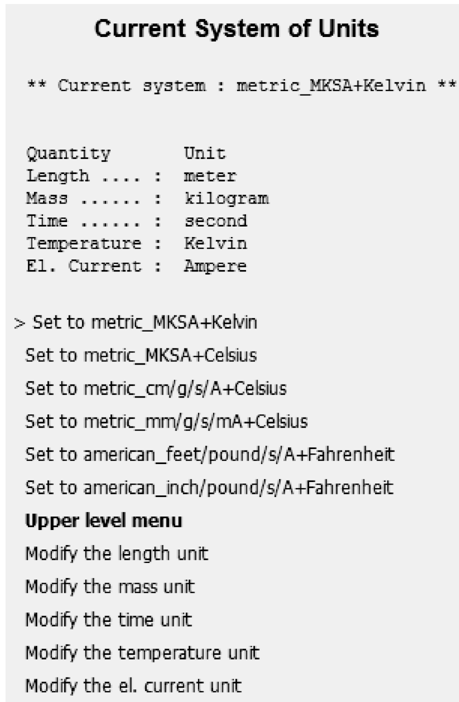


图 5-52　单位设定页面

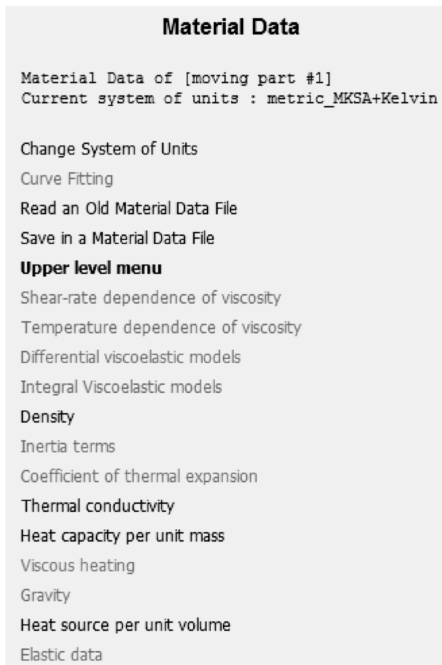


图 5-53　运动部件物性参数设定页面（单位制设定后）

在完成第一个运动部件的设定后，返回如图 5-54 所示的运动部件定义页面。相比图 5-47，图 5-54 列出了已经完成定义的第一个运动部件。单击其中的 Creation of a new moving part 选



项，开始第二个螺杆元件运动部件的设定。当系统提示是否复制当前现有的运动部件时，单击 Yes 按钮，如图 5-55 所示。在打开的 Copy a moving part（复制列表）页面（见图 5-56）中，单击 moving part #1 选项，进入如图 5-57 所示的 moving part #2（运动部件 2）设定页面。在选定第二个运动部件对应的计算区域（Add sdom re3）后，只需将旋转轴原点坐标变为（-0.0105,0,0）即可[⊖]。

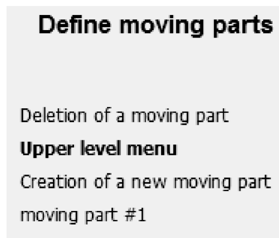


图 5-54　运动部件定义页面（第一运动部件设定后的状态）

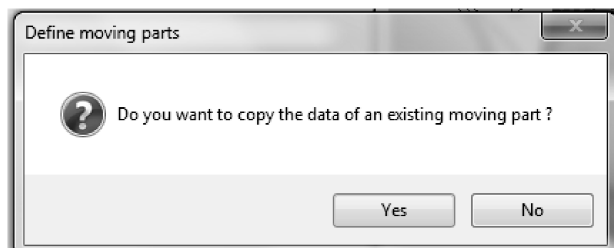


图 5-55　关于定义运动部件的系统提示

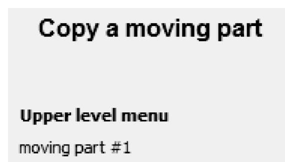


图 5-56　复制列表页面

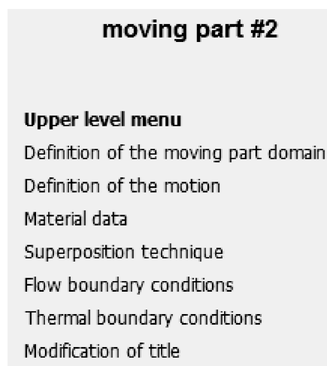


图 5-57　运动部件 2 设定页面

2. 创建后处理子任务

返回如图 5-58 所示的 F. E. M Task 1 有限元任务设定窗口。对比图 5-6 和图 5-58，可以发现当前已经完成了 TES_noniso 任务的设定。

（1）黏性热与耗散功后处理子任务

单击图 5-58 中的 Create a sub-task（创建子任务）选项。此时，系统提示是否复制现有子任务（见图 5-59）。由于这里要设定的后处理子任务与之前的流场设定任务不属于一类，因此单击 No 按钮。进入如图 5-60 所示的流场任务设定后的子任务类型选择页面。对比图 5-7 和图 5-60，可以发现，页面中原本为灰色的 Postprocessor 选项已经变为黑色的可选状态。单击该选项后，首先为后处理子任务

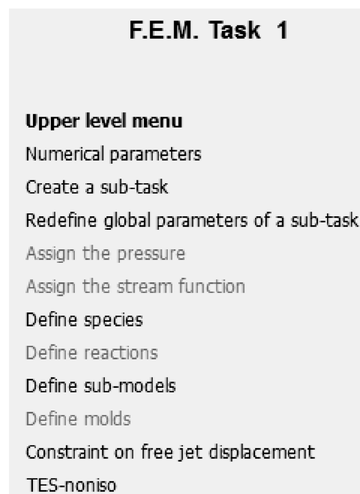
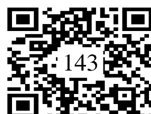


图 5-58　F. E. M Task 1 有限元任务设定窗口（TES_noniso 任务设定后）

⊖ 由于在图 5-55 中单击了 Yes 按钮，因此在进行运动部件的运动设定时，只需要修改原点坐标，其他参数已经通过复制操作继承。



命名，输入 viscous heating（黏性热）作为后处理子任务的名称，并进入如图 5-61 所示的后处理子任务类型选择页面，选择 Viscous heating and dissipated power（黏性热和耗散功）选项。随后系统提示该后处理任务将在名为 Add sdom req 的流体区域上进行计算（见图 5-62），单击 OK 按钮确认即可。

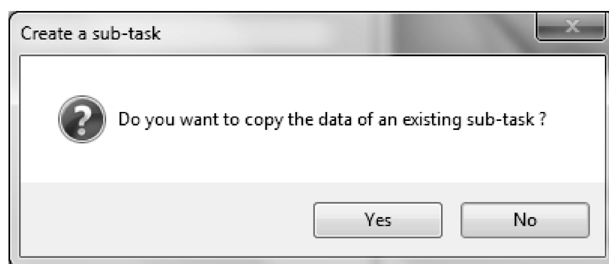


图 5-59　系统关于创建子任务的提示

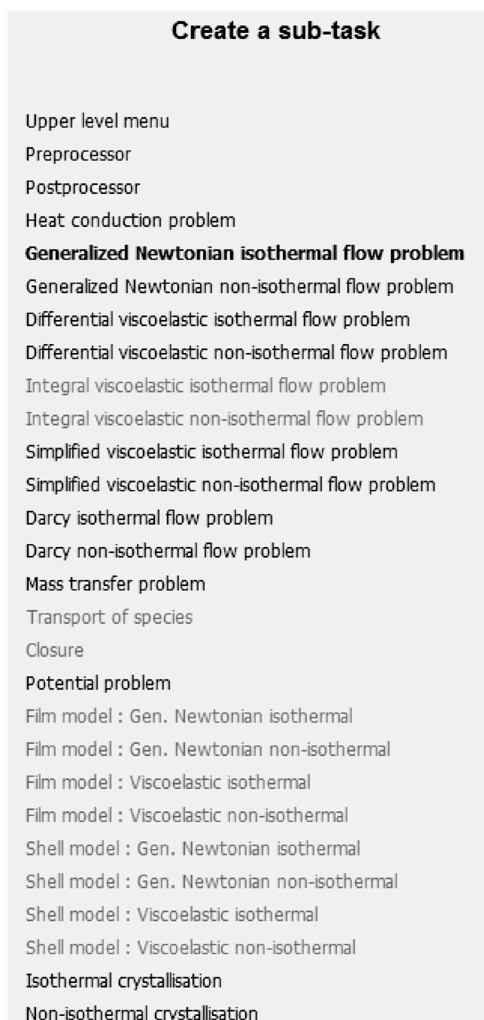


图 5-60　子任务类型选择页面（流场任务设定后）

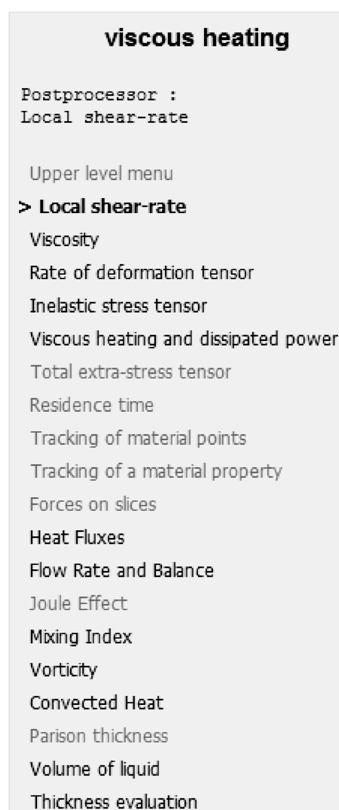


图 5-61　后处理子任务类型选择页面



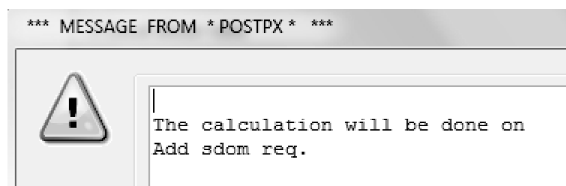


图 5-62　关于后处理计算区域的系统提示

（2）边界对流换热后处理子任务

返回如图 5-63 所示的 F. E. M Task 1 有限元任务设定窗口。对比图 5-58，该图中列出了已经完成的名为 viscous heating 的后处理子任务。

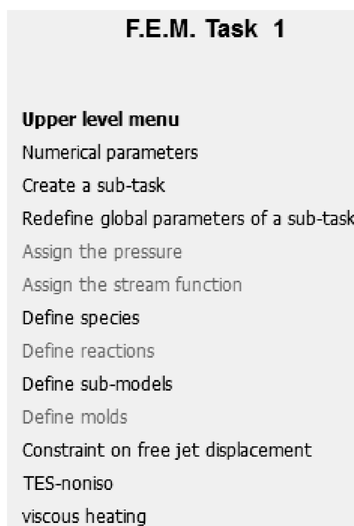
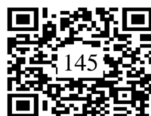


图 5-63　F. E. M Task 1 有限元任务设定窗口
（viscous heating 后处理子任务设定后的状态）

单击其中的 Create a sub-task（创建子任务）选项。此时，系统提示是否复制现有子任务（见图 5-59），这时单击 Yes 按钮，在前一个后处理子任务的基础上定义当前后处理任务，在打开的如图 5-64 所示的选择要复制的子任务页面中单击 viscous heating 选项，并将新的子任务命名为 Convected Heat。在如图 5-65 所示的对流换热后处理子任务类型选择页面中，选择 Convected Heat 选项，系统提示该后处理任务将在名为 Add sdom req 的流体区域的某一个边界上进行计算（见图 5-66）。单击 OK 按钮后，系统进入如图 5-67 所示的对流换热边界设定页面。分别选中五个边界，单击 Modify 按钮，进入如图 5-68 所示的对流换热边界选项页面，选择其中的 Convected heat calculated 选项进行对流换热计算。这样系统将在所有边界上进行对流换热的换热量计算。

（3）创建其他后处理子任务

继续创建热流密度（heat fluxs）、剪切速率（local shear rate）、黏度（viscousity）、变形速率张量（Rate of deformation tensor）、非弹性应力张量（inelastic stress tensor）、混合指数（mixing index）等后处理子任务。



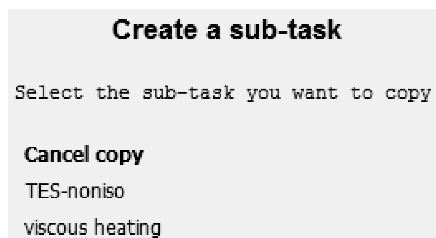


图 5-64　选择要复制的子任务页面

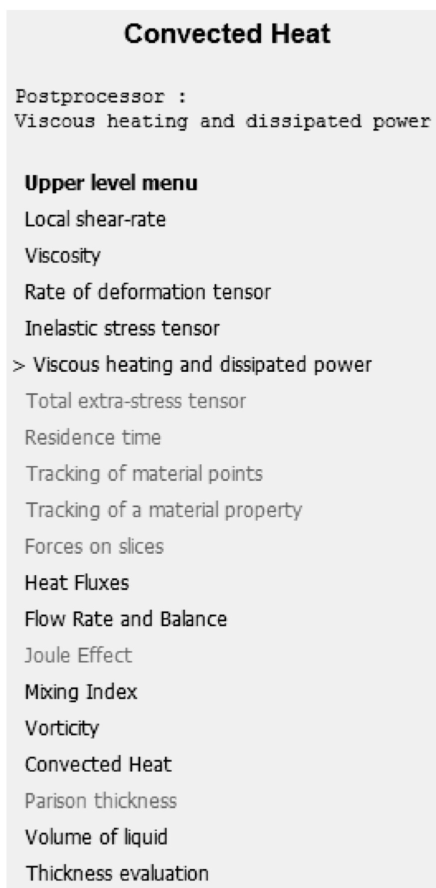


图 5-65　对流换热后处理子任务类型选择页面

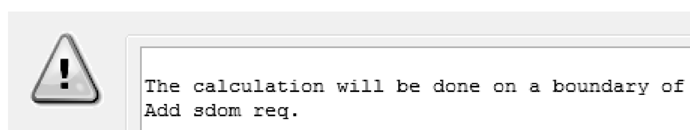
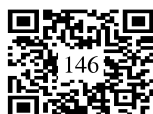


图 5-66　后处理将在某个边界上进行计算的系统提示



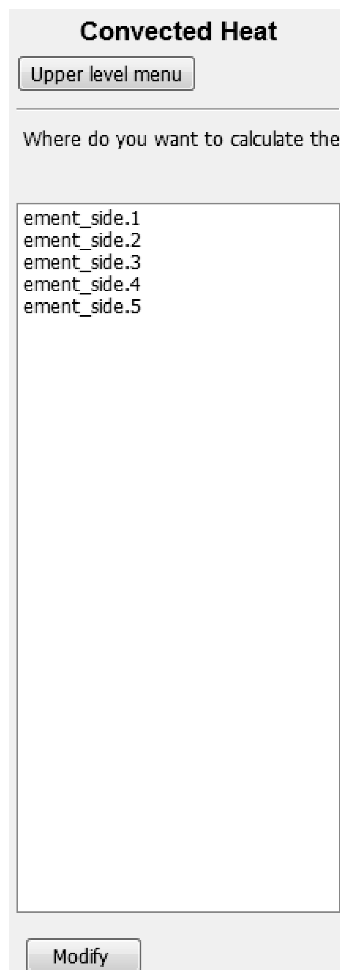


图 5-67 对流换热边界设定页面

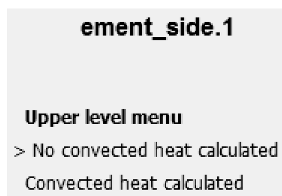


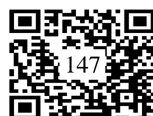
图 5-68 对流换热边界选项页面

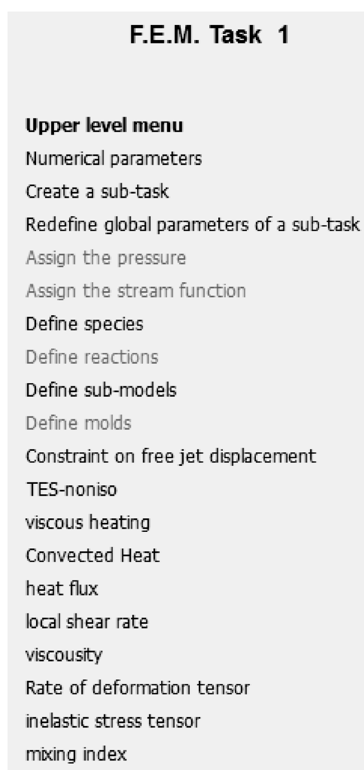
3. 数值参数的设定

返回如图 5-69 所示的有限元任务 1 设定页面，单击其中的 Numerical parameters（数值参数）选项，进入如图 5-70 所示的数值参数设定页面。

（1）迭代数值参数

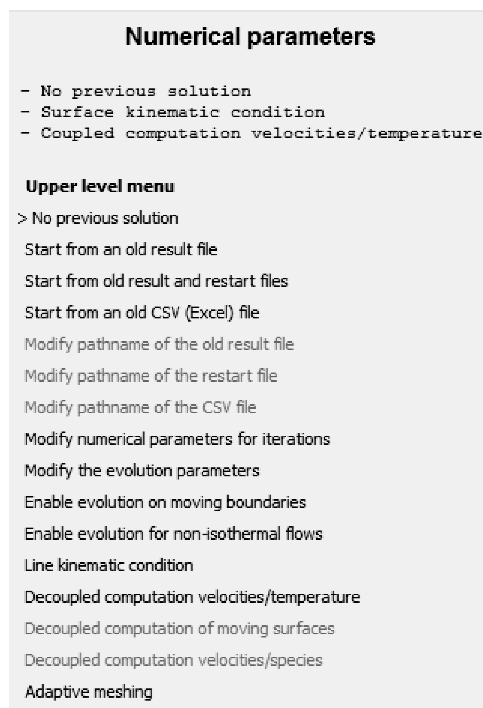
单击图 5-70 中的 Modify numerical parameters for iterations（编辑迭代数值参数）选项，进入如图 5-71 所示的迭代数值参数设定页面。




F.E.M. Task 1

Upper level menu
Numerical parameters
Create a sub-task
Redefine global parameters of a sub-task
Assign the pressure
Assign the stream function
Define species
Define reactions
Define sub-models
Define molds
Constraint on free jet displacement
TES-noniso
viscous heating
Convected Heat
heat flux
local shear rate
viscousity
Rate of deformation tensor
inelastic stress tensor
mixing index

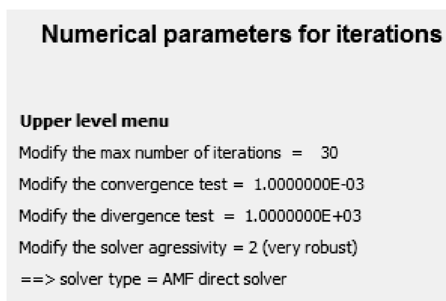
图 5-69　有限元任务 1 设定页面（后处理子任务设定后的状态）


Numerical parameters

- No previous solution
- Surface kinematic condition
- Coupled computation velocities/temperature

Upper level menu
> No previous solution
Start from an old result file
Start from old result and restart files
Start from an old CSV (Excel) file
Modify pathname of the old result file
Modify pathname of the restart file
Modify pathname of the CSV file
Modify numerical parameters for iterations
Modify the evolution parameters
Enable evolution on moving boundaries
Enable evolution for non-isothermal flows
Line kinematic condition
Decoupled computation velocities/temperature
Decoupled computation of moving surfaces
Decoupled computation velocities/species
Adaptive meshing

图 5-70　数值参数设定页面


Numerical parameters for iterations

Upper level menu
Modify the max number of iterations = 30
Modify the convergence test = 1.0000000E-03
Modify the divergence test = 1.0000000E+03
Modify the solver agressivity = 2 (very robust)
==> solver type = AMF direct solver

图 5-71　迭代数值参数设定页面（设定后的状态）

图 5-71 中的 Modify the max number of iterations（迭代最大次数）选项给定每一步计算过程中所允许的最大迭代次数。对于复杂问题可以将该参数适当放大，以防止步数不够，系统自动停止计算。Modify the convergence test（收敛测试）选项可以编辑相对误差的数值。收敛测试是通过计算中所有场的相对误差来判断，当所有场量的相对误差最大值小于设定参数时，表示当前步计算收敛。Modify the divergence test（发散测试）选项可以编辑发散标准数值。当相对误差大于给定数值时，说明计算发散，不收敛。本例中上述参数均保持默认。此外，计算中还使用默认的 AMF 直接求解器。

（2）演变参数

单击图 5-70 中的 Modify the evolution parameters（编辑演变参数）选项，进入如图 5-72



所示的演变参数设定页面。这部分设定内容与 5. 2. 1 节中的黏性热影响系数的演变参数设定一致。如果在该节中完成了演变参数的设定，则此处不用再设定。

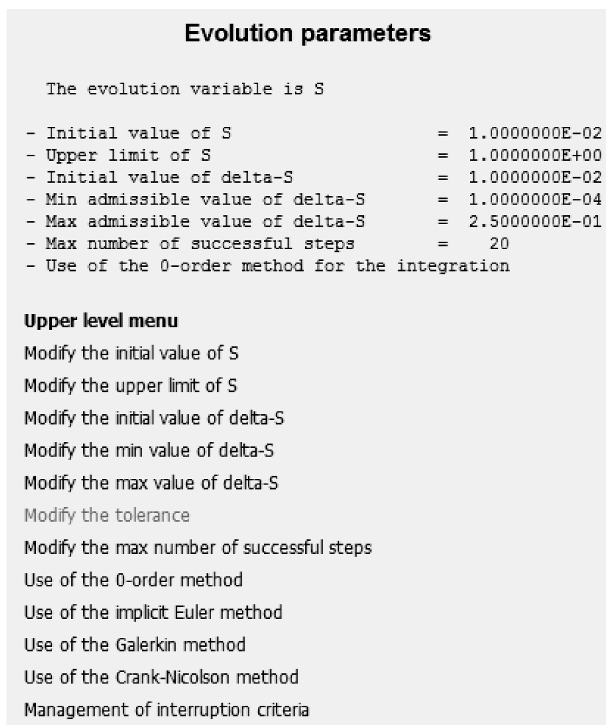


图 5-72　演变参数设定页面

（3）非等温流动问题的演变

单击图 5-70 中的 Enable evolution for non-isothermal flows（开启非等温流动演变使能）选项，可以让系统对非等温问题进行自动演变。本例中已经从黏性热影响系数和出口背压角度进行了演变设定，所以这里保持该选项为非使能状态⊖如已经点击该选项，其名称将变为 Disable evolution for non -isothermal flows。此时，需再次点击该选项，使其还原为 Enable evolution for non -isotherm-rmal flows。”。

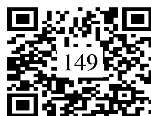
（4）速度和温度的耦合

单击图 5-70 中的 Decoupled computation velocities/temperature 选项可以将问题转换为速度/温度非耦合问题，同时该选项也变为 coupled computation velocities/temperature 的形式。当选定速度/温度耦合时，计算时 NS 方程组合和能量方程的计算结果相互影响，将加大计算资源和时间的消耗。本例中需确保速度和温度的耦合计算，对应选项的状态为 Decouple computation velocities/temperature。”

5. 2. 2　输出的设定

返回如图 5-73 所示的 Polydata 设定页面。单击其中的 Outputs 选项，进入如图 5-74 所示的输

⊖ 对于无法得到收敛结果的情况，可以尝试开启该选项，进行非等温流动演变计算。



出设定页面。确定输出 FieldView 和 Polyflow 两种类型的结果。单击 Output Triggering 选项，进入如图 5-75 所示的输出控制页面，单击 Output at exact ds（在精确 s 步长上输出结果）选项，并定义 s 步长为 0.25。

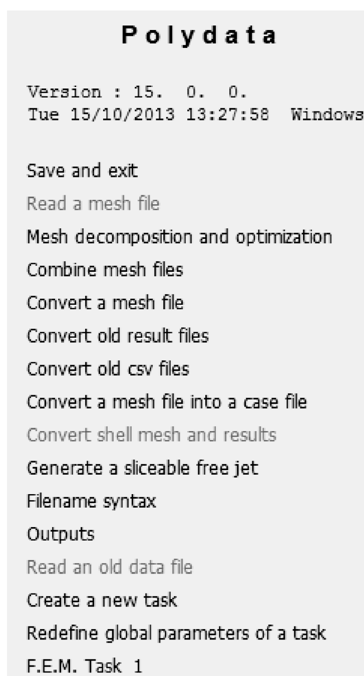


图 5-73　Polydata 设定页面（F. E. M Task 1 设定后的状态）

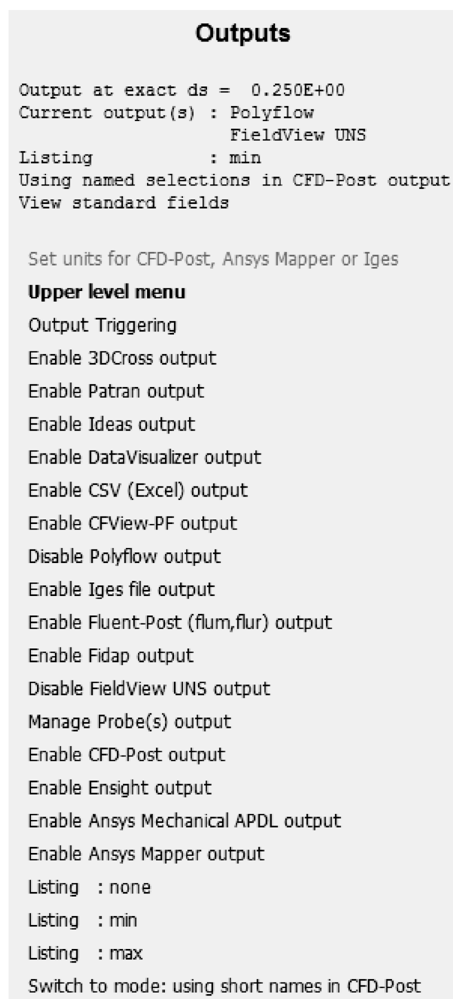


图 5-74　输出设定页面（设定后的状态）

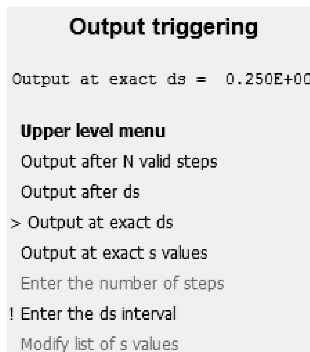
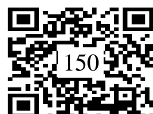


图 5-75　输出控制页面（设定后的状态）



完成输出设定后，返回如图 5-73 所示的 Polydata 设定页面，单击 Save and exit 选项存储并退出 Polydata。此时系统提示：非等温流动问题会造成收敛困难，提示是否激活收敛算法（见图 5-76）。该对话框的作用与 5. 2. 1 节中的非等温流动问题的演变设定是同一个内容，所以单击否按钮。这里不使用该非等温演变算法。

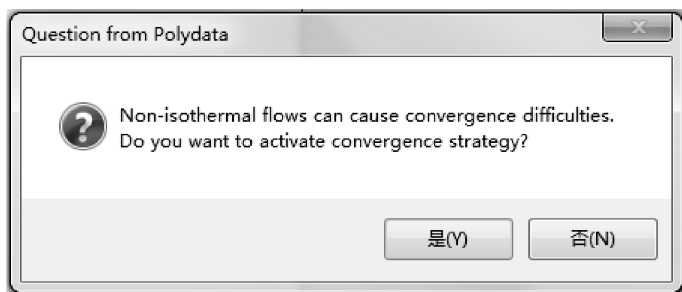


图 5-76　关于非等温收敛问题的系统提示

5. 2. 3　流场结果管理

进入如图 5-77 所示的场变量管理页面后，可以选择在输出结果中所包含的流场变量，包含速度、压力、运动部件 1 内部区域、运动部件 2 内部区域、黏度、剪切速率及运动部件的速度场等。

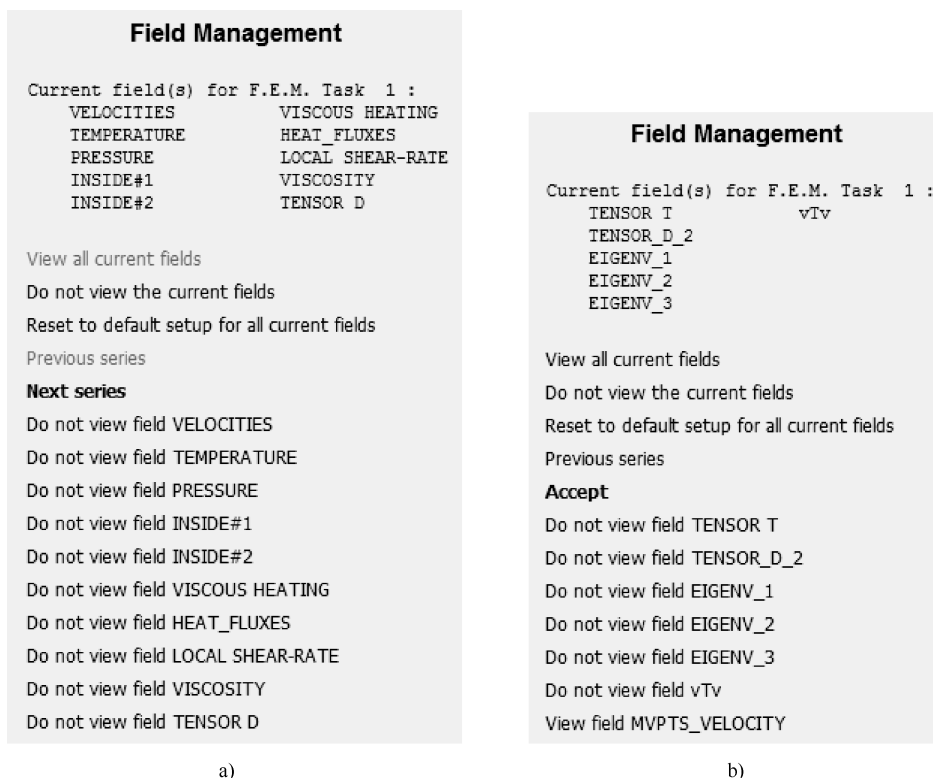
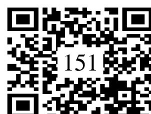


图 5-77　场变量管理页面



5.2.4 文件管理

继续退出过程中，会出现如图 5-78 所示的文件管理页面。在这里可以设定输出结果 res 文件、重新启动 rst 文件、Polyflow 结果 res_2 文件以及 FieldView 类型 fv 文件的文件名。

设定后，退出 Polydata 窗口，返回 Polyman 窗口。单击 Polyman 刷新按钮后，仿真任务文件树中出现 dat 文件，如图 5-79 所示。

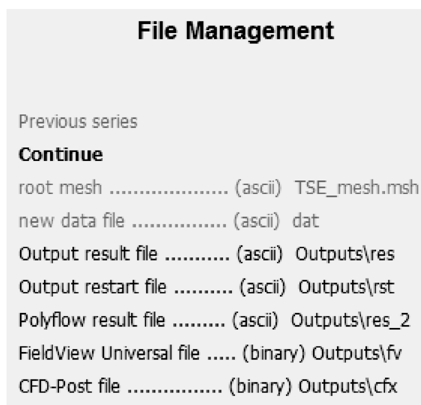


图 5-78 文件管理页面

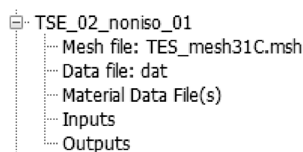


图 5-79 完成设定后的仿真任务文件树

5.2.5 任务运行

单击 Polyman 窗口→tools 菜单→options 子菜单→polyflow 选项，打开如图 5-80 所示的

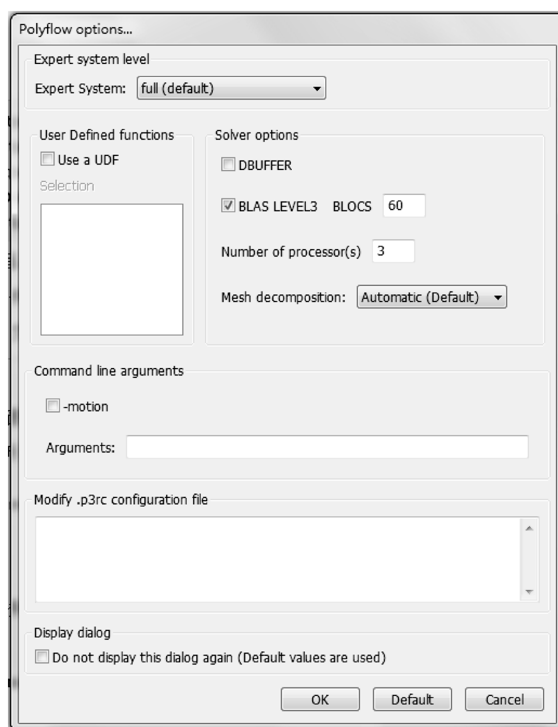


图 5-80 Polyflow 选项设定页面



Polyflow 选项设定页面，将计算所需的 CPU 核数设定为 3。完成设定后，单击运行按钮进行计算。

5.3　对比方案的设定

在 Polyman 窗口中创建名为 TSE_02_noniso_02 的计算任务，并将 TSE_02_noniso_01 任务文件树中的 msh 和 dat 文件通过复制和粘贴操作复制到 TSE_02_noniso_02 任务中。操作完成后的任务树如图 5-81 所示。双击 msh 或 dat 文件进入如图 5-82 所示的 Polydata 设定窗口。

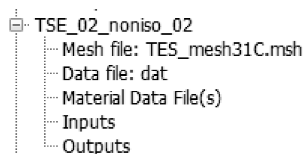


图 5-81　TSE_02_noniso_02 任务的文件树

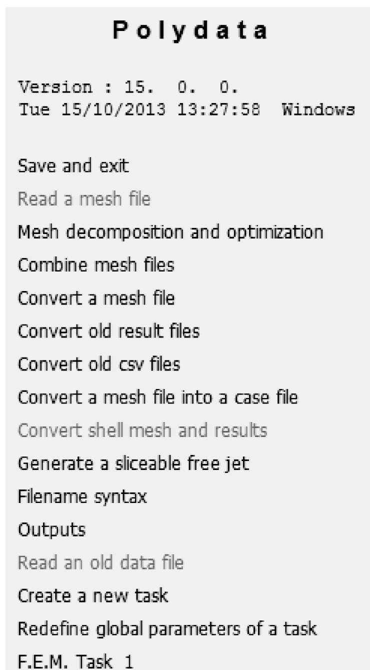


图 5-82　Polydata 设定窗口

单击图 5-82 中的 F. E. M Task 1 选项，进入如图 5-83 所示的有限元任务 1 设定页面。单击其中的 TES_noniso（流场计算子任务）选项，进入如图 5-84 所示的流场子计算任务设定页面。单击其中的 Thermal boundary conditions 选项，进入如图 5-85 所示的温度边界条件设定页面。选中入口边界，单击 Modify 按钮，进入如图 5-86 所示的边界 1 热边界类型选择页面，选择其中的 Temperature imposed 选项，进入如图 5-87 所示的边界 1 施加温度边界条件数值输入页面，将数值设定为 453. 15K。返回如图 5-85 所示的设定页面，再修改出口边界类型为 Outflow 类型。修改后的温度边界条件设定页面如图 5-88 所示。逐步退出并保存，完成设定，退出 Polydata⊖。

⊖ 退出过程中会出现关于非等温收敛问题的系统提示（见图 5-76）。为了展示两种方法计算的可对比性，还需在出现该系统提示时单击否按钮。



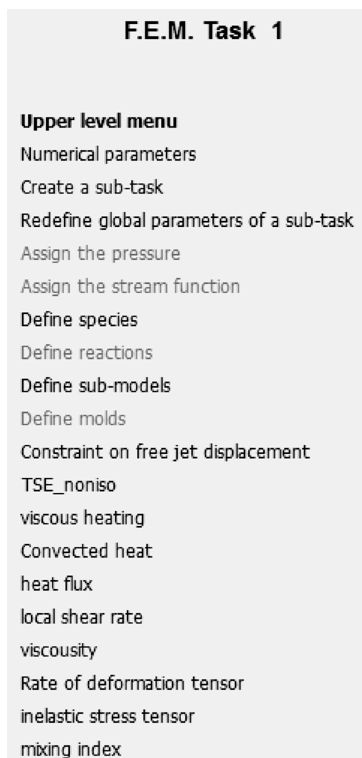


图 5-83 有限元任务 1 设定页面



图 5-84 流场子计算任务设定页面

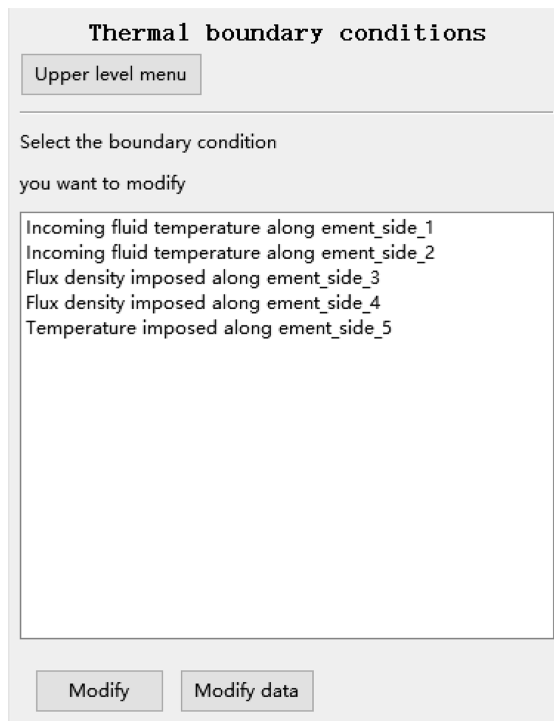
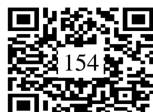


图 5-85 温度边界条件设定页面



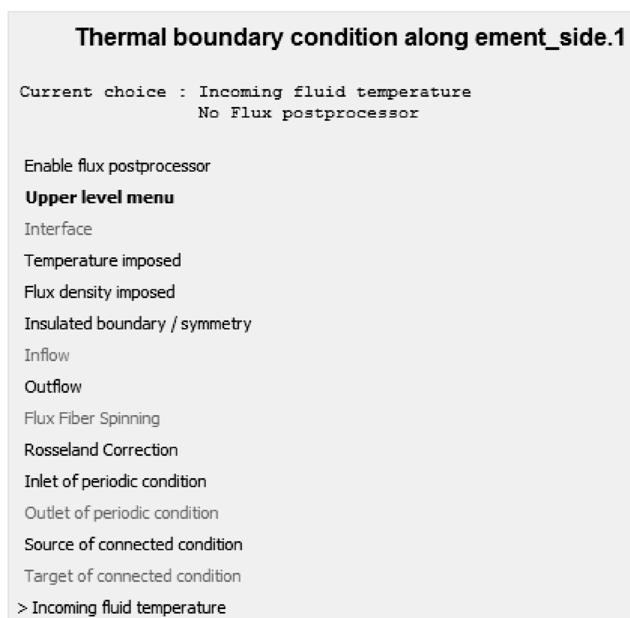


图 5-86　边界 1 热边界类型选择页面

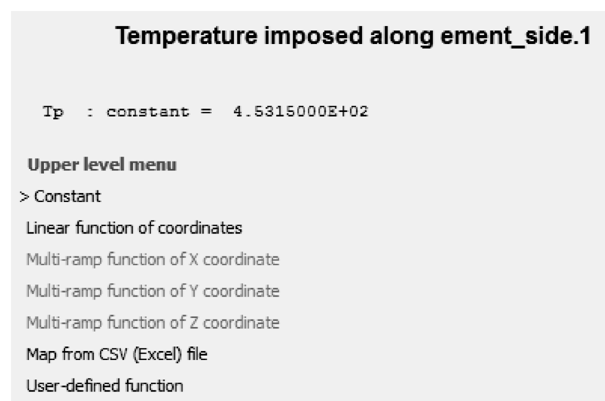


图 5-87　边界 1 施加温度边界条件数值输入页面（设定后的状态）

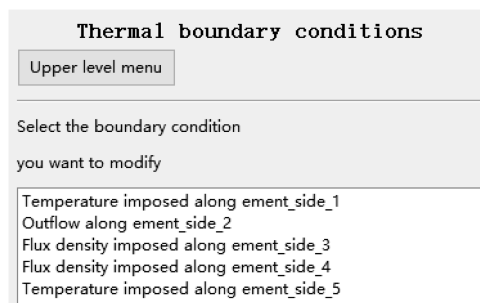


图 5-88　修改后的温度边界条件设定页面



5.4 程序运行过程及结果对比

5.4.1 程序运行过程

在仿真任务计算过程中，可以利用 Polydiag 软件检查计算收敛过程。在文件树中选择要计算的仿真任务后，在 Polyman 窗口中单击 programs 菜单→other 子菜单→polydiag 选项，启动如图 5-89 所示的 Polydiag 初始窗口。其中了给出了当前计算的基本情况，共有三个 CPU 在进行计算。单击 Simulation 菜单中的 Current status 命令，打开如图 5-90 所示的演变信息窗口。单击 Solvers 按钮，进入图 5-91 所示的当前求解器信息窗口。单击其中的 Convergence 按钮，开启当前步求解过程相对误差变化表（见图 5-92）。图 5-92 中给出了同一个迭代计算中完成两次迭代和四次迭代时的速度和温度场的相对误差。图 5-92b 中显示速度已经收敛，但温度的相对误差还大于 0.001，后续还需继续计算。

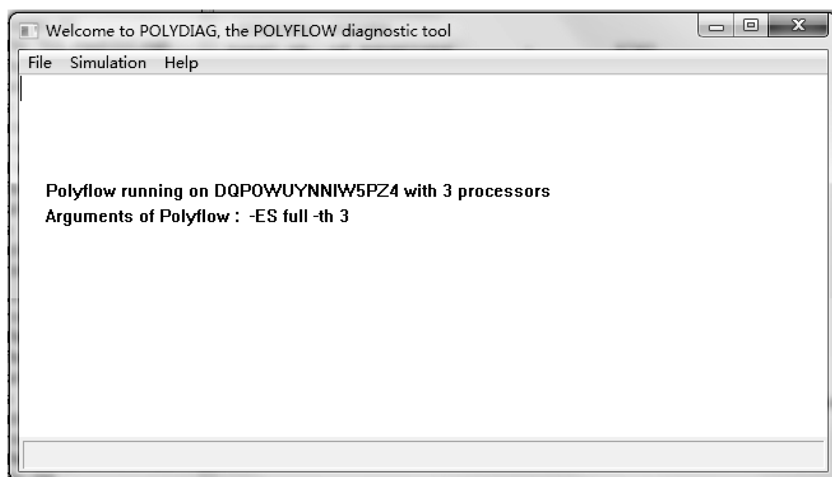


图 5-89 Polydiag 初始窗口

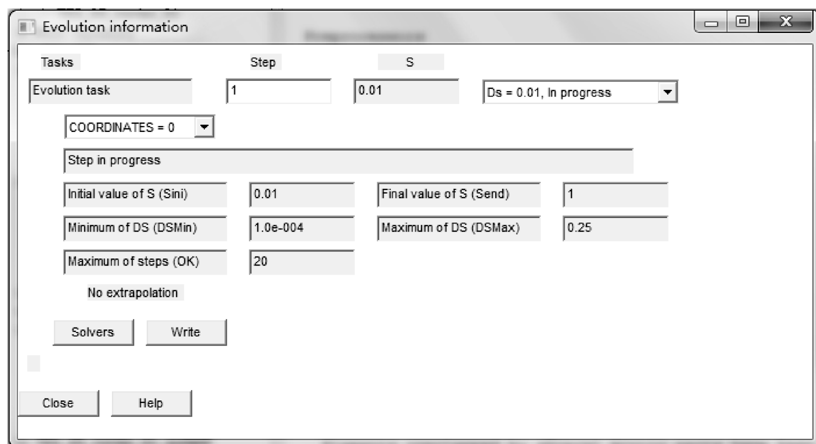
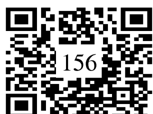


图 5-90 演变信息窗口



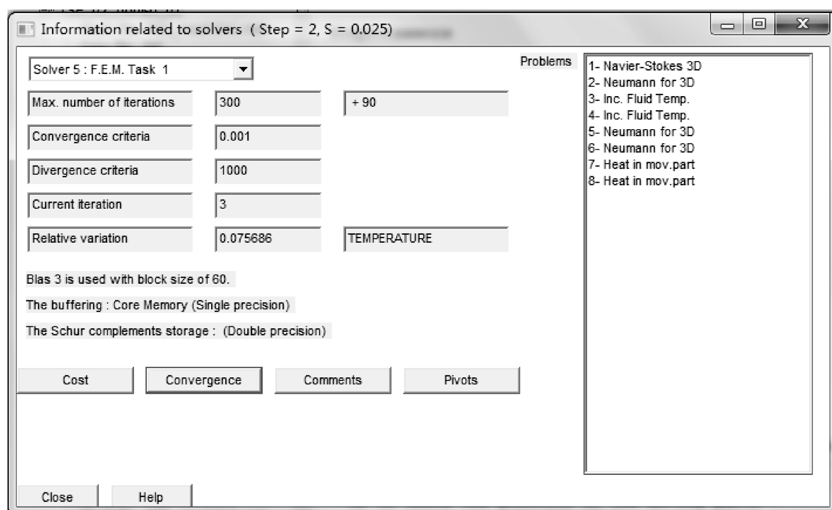


图 5-91　当前求解器信息窗口

Analysis of the convergence for solver : F.E.M. Task 1

	VELOCITIES	TEMPERATURE
1	0.020936	0.0023126
2	0.003905	0.07569

a)

Analysis of the convergence for solver : F.E.M. Task 1

	VELOCITIES	TEMPERATURE
1	0.020936	0.0023126
2	0.003905	0.07569
3	0.001591	0.017598
4	0.0007409	0.0030551

b)

图 5-92　当前步求解过程相对误差变化表

5.4.2　结果对比

TSE_02_noniso_01 计算任务成功，而 TSE_02_noniso_02 计算任务失败。图 5-93 给出了 TSE_02_noniso_02 计算任务失败的信息。演变参数在 0.6563 时，计算因 S 增大步长已经小于最小步长而停止。但是值得注意的是，我们获得了 S＝0.25 和 S＝0.5 两个工况下的计算结果。其中黏性热影响因子分别为 0.25 和 0.5，且出口压力为 7500Pa 和 15000Pa㊀。

㊀ 尽管有很多方法可以帮助 TSE_02_noniso_02 计算任务获得收敛结果，实际上，TSE_02_noniso_02 计算任务的边界条件的计算结果存在问题，不用过多追求获得收敛结果。



```
**********************************
*   Summary of the simulation   *
**********************************

   The computation failed.


****************************
* Expert tool diagnostics *
****************************

Out of convergence disk


****************************
* Expert tool diagnostics *
****************************

The problem F.E.M. Task  1  has not converged.

The evolution scheme can not reach the final value of the evolution
parameter 1.  Evolution stops for a value of the evolution parameter
equals to 0.6563 because the step size has been reduced below the
minimum (as assigned in Polydata).
```

图 5-93　TSE_02_noniso_02 计算任务失败的信息

1. 两种边界出口速度和温度分布

出口界面的温度分布如图 5-94 所示，出口界面的速度分布如图 5-95 所示。

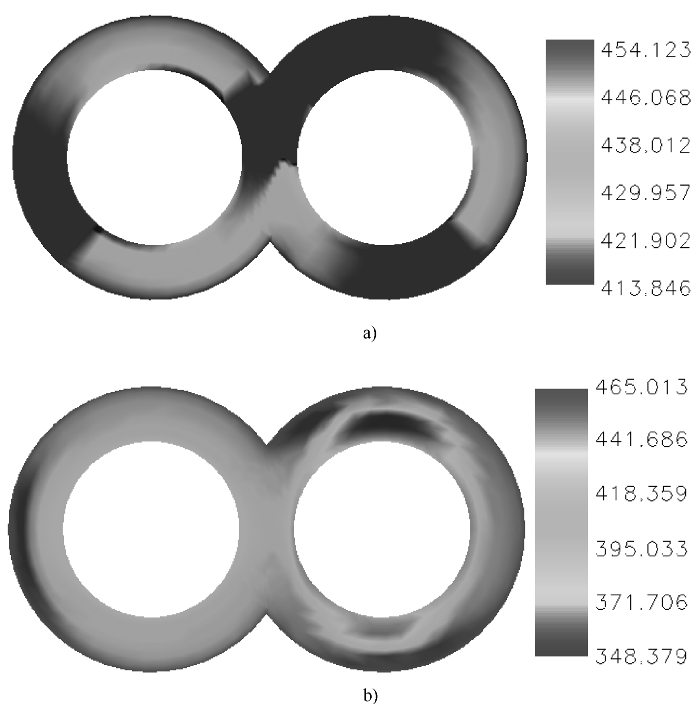


图 5-94　出口界面的温度分布

a）TSE_02_noniso_01　b）TSE_02_noniso_02



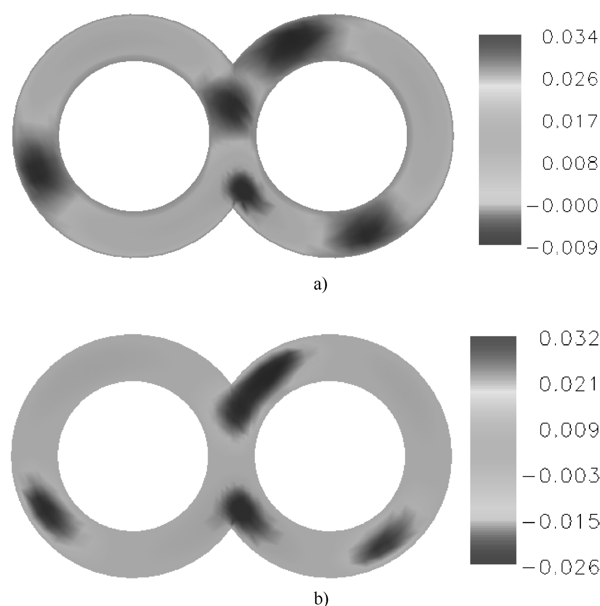


图 5-95　出口界面的速度分布
a）TSE_02_noniso_01　b）TSE_02_noniso_02

对比图 5-94a 和图 5-94b 可以看出，TSE_02_noniso_02 计算任务中出现了 348. 379K 的温度数值。而对比图 5-95a 和图 5-95b 可以看出，TSE_02_noniso_02 计算任务的出口截面上回流更加显著。TSE_02_noniso_01 中回流温度强制赋值为 453. 15K，而 TSE_02_noniso_02 中的回流温度是计算得到的。相对而言，TSE_02_noniso_01 所得结果更为合理。

2. TSE_02_noniso_01 收敛计算结果

图 5-96 给出了 TSE_02_noniso_01 收敛计算结果，图中的颜色数值对照表给出了温度分

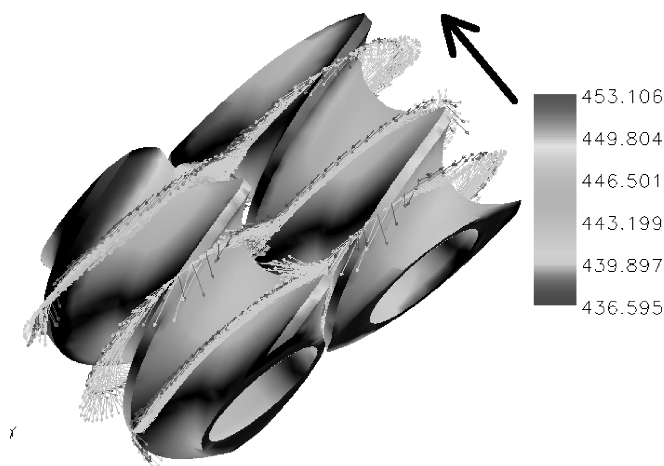
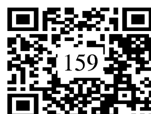


图 5-96　TSE_02_noniso_01 收敛计算结果（演变参数 S = 1）



布状态。截面上的速度向量的颜色和长度均体现速度的大小。从颜色分布来看，出口背压在30000Pa 下，挤出方向从入口到出口温度呈线增加的趋势，并且沿着径向向外的方向，温度逐渐增加。

3. 在演变参数 S 逐渐增大的过程中相关参数的变化

在演变计算中，演变参数 S 的变化过程如图 5-97 所示。如图可见，开始时 S 数值很小，且步长也很小。随着计算的进行，由于没有出现失败的迭代步骤，因此 S 数值增加的同时，步长也在增加。共计进行了 14 步计算，S 达到 1，计算结束。

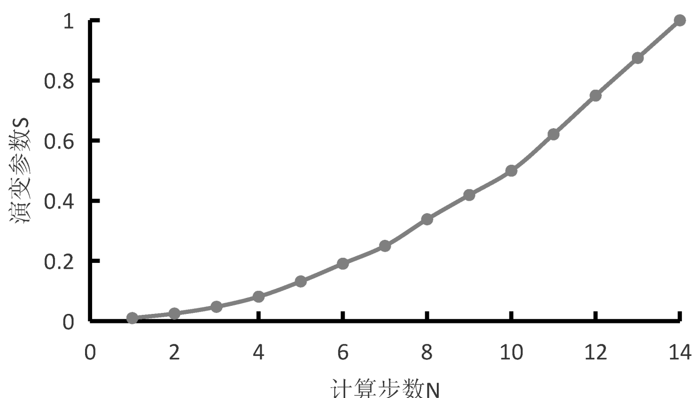


图 5-97　演变参数 S 的增大过程

图 5-98 给出了随着演变参数 S 的增加，耗散功率的变化规律。随着 S 的增加，耗散功率增大。随着 S 的增加，在黏性热影响因子增加的同时，背压增加，这些都会使耗散功率增大。

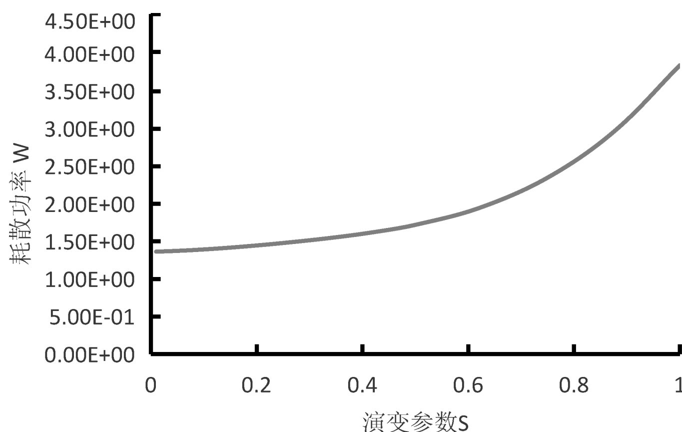
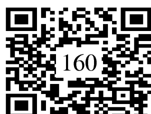


图 5-98　S 增加过程中耗散功率的变化趋势

图 5-99 给出了随着演变参数 S 的增加，出口流率的变化规律。随着 S 增加，出口流率



呈现减小趋势。当 S 约等于 0. 55 时，出口流率为零。随后，背压过大，导致产量为负。

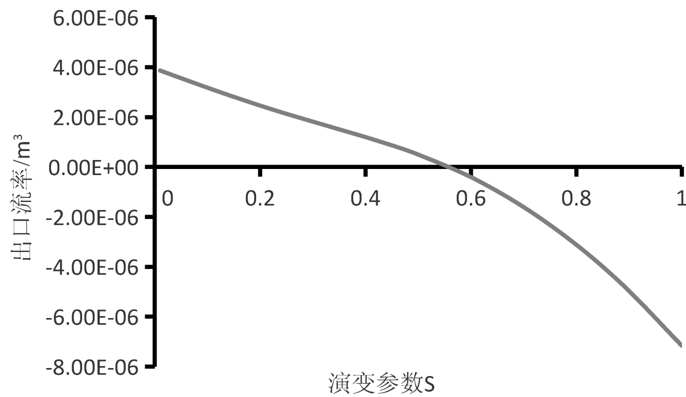


图 5-99　S 增加过程中出口流率的变化趋势

图 5-100 给出了随着演变参数 S 的增加，左螺杆轴向力的变化规律。随着 S 的增加，出口压力增加，轴向力呈现增大趋势。

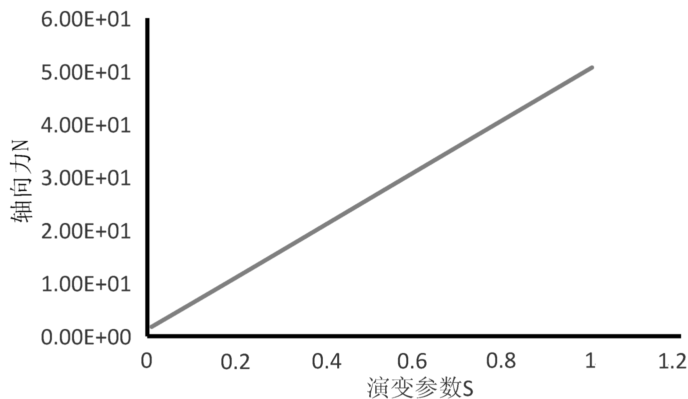
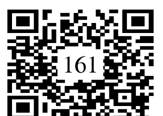


图 5-100　S 增加过程中左螺杆轴向力的变化趋势



第 6 章

适应性网格技术在双螺杆挤出仿真中的应用

适应性网格技术是解决双螺杆挤出仿真中网格局部加密问题的重要手段之一。本章在对适应性网格技术进行介绍的基础上，讲述在 Polydata 设定过程中使用适应性网格技术的操作方法，还要对比适应性网格技术中网格细化次数对仿真结果的影响以及对计算资源的要求。

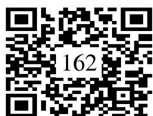
6.1　适应性网格技术

在双螺杆挤出模拟中，由于使用了网格重叠技术，因此可以有效降低流体区域网格划分的复杂程度。但是，这一技术也降低了计算的精度。这是因为在螺杆元件表面附近无法形成清晰的表面轮廓。特别是，在计算中往往还会出现如图 6-1 所示的系统提示：流体单元同时被多个运动部件重叠。这种情况会导致压力峰值或流体漏流，建议在发生这一现象的局部进行流体网格细化，或者检查运动部件的位置。这不仅是螺杆表面轮廓清晰程度的问题，而且还在两螺杆的啮合区出现了一个流体网格被两个运动部件同时重叠的现象。这两方面均对流体区域网格提出了加密的要求。同时，对于瞬态任务，在模拟过程中螺杆相对位置发生变化，很可能在模拟开始时网格具有较好的质量，而随着螺杆的转动，流体网格质量降低，甚至会影响计算的收敛。

```
*** WARNING *** from [Check_overlapping]
   Elements overlapped by several moving parts have been detected !
   This situation can lead to pressure peaks and fluid leakage.
   It is recommended to refine the flow domain mesh in those areas
   or to check the position of the moving parts !
```

图 6-1　使用网格重叠技术时出现的一个流体单元被多个运动部件重叠的警告

无论如何，为了获得精度高的计算结果，就要求在运动部件轮廓附近具有较高的网格密度。这样在使用网格重叠技术时，才能精确地描述运动部件的轮廓，并由此获得高精度的计算结果。解决这个问题的途径：① 整体加大网格密度。这一方法表面可行，但实际上，要达到理想的计算精度，总体网格的数量将非常大，将造成计算资源严重浪费。② 进行局部网格密度增加。这一方法虽然一定程度上解决了方法①过多要求计算资源的问题，但是由于螺杆元件表面轮廓的复杂性，在前处理环节中完成网格的局部加密也存在困难。幸运的是，使用适应性网格技术可以在一定程度上解决上述问题。



6.1.1　inside 场

对于使用网格重叠技术的问题来说，计算中使用一个描述流体区域是否被运动部件重叠的场变量在流体区域网格中构建运动部件轮廓。这个场变量在 Polyflow 中名为 inside。如果节点 inside 的值为 0，则说明该节点属于流体区域，如果节点处场值为 1，则表明该节点重叠在运动部件区域内。可以根据单元内 inside 场的变化梯度来确定该单元是否与运动部件表面相交。如果 inside 场在某个单元的变化梯度不等于 0（实际操作时规定其大于某一个数值），系统则认为该单元包含了一部分的运动部件边界，这样的单元在计算中需要进一步细化，以获得更加精确的运动部件轮廓形状。同时，如果在某些单元内，inside 场的变化梯度很小，接近于 0，则认为该单元完全属于某一计算区域（流体区域或运动部件区域），则这些网格不用细化。为此，在适应性网格相关设定中需要选择 Activate adaptive meshing for moving parts（为运动部件开启适应性网格算法）选项。

在瞬态/演变仿真中，由于运动部件旋转，流体区域内所有单元都会与运动部件的边界接触，因此它们都会被细化。当运动部件离开了细化位置时，这些细化的单元将不再需要，否则它们的出现将增加计算时间和内存用量。为此，Polyflow 将移除这些细化后的子单元，将其复原为原来的网格。

6.1.2　细化方案

在使用适应性网格技术对网格进行细化时，不同维度的网格细化方案不同。对于一维线段单元来说，利用单元中点，将单元长度分为两等份；对于二维四边形单元来说，利用单元面中点，将单元分为四等份；对于三维六面体单元来说，利用单元边中点、面中点和体中点，将单元分为八等份。

此外，对于使用网格重叠技术进行流场计算的求解任务来说，网格的细化是逐级完成的。以一个三维六面体单元为例：当细化次数 Maxdiv 等于 1 时，一个网格被分为 8 个子网格；当 Maxdiv 等于 2 时，一个网格最多将被分为 64 个子网格；当 Maxdiv 等于 3 时，一个网格最多将被分为 512 个子网格[⊖]。

6.1.3　相关参数

在进行网格重叠（MST）类型问题的适应性网格技术求解时，需要设定如下几个参数。

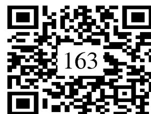
1. 网格细化频率参数（Nstep）

Nstep 参数表示每隔 Nstep 个时间步长使用一次网格重叠技术。对于 MST 仿真来说，Nstep 数值通常设定为 1。这是因为在不同的时间点，运动部件的位置发生变化，流体区域的实际几何是不同的。

2. 网格细化次数（Maxdiv）

Maxdiv 定义为在每次使用适应性网格技术时网格被细化的次数。这个参数使用时要考虑计算内存容量。

⊖ 在进行细分时，某个单元会被细分但是其相邻的单元没有被细分。在这种情况下，对于面上或边上多出的节点来说，求解器将使用强制保形算法，以确保场量的连续性。



3. 其他参数

此外，在带有运动部件的适应性网格问题来说，还涉及 Sup 和 Sdo 两个参数。在网格重叠技术中，需要根据每个单元内 inside 场值的变化量来确定该单元是否需要被细化。如果 inside 场在一个单元内的变化量大于 Sup 给定数值，则这个单元需要被细化，默认 Sup 等于 0.05；如果 inside 场在一个单元内的变化量小于 Sdo，则这个单元就不需要细化，Sdo 的默认值为 0.01。

看到这里，有些读者可能暂时不理解这些概念，但不会影响后续章节的学习。

6.2　使用适应性网格技术时 Polydata 的操作方法

本节讲解在 Polydata 中使用适应性网格技术时的相关操作步骤。

6.2.1　网格文件

使用的网格如图 6-2 所示，网格数量为 5616 个。径向网格分段数为 6，轴向网格分段数为 13，圆周方向网格数为 30（C 形区）+6（啮合区），无边界层。建立网格的步骤与第 2 章相关章节基本一致，但是网格数量大大减少。这主要是因为在使用适用性网格技术进行网格细化时，当细化次数为 1 时，与运动部件边界相交的每个六面体网格将被划分为 8 个网格；当细化次数为 2 时，与运动部件边界相交的每个六面体网格将再次被划分为 8 个网格；当细化次数为 3 时，在已经被细化了两次的网格中，与运动部件边界相交的六面体网格还将被划分为 8 个网格。如果基础网格数量较多，则细化后网格数量将会十分巨大，对计算资源的消耗也是很多计算机无法承受的。使用的网格文件名为 TSE_msh_corase. msh，可通过扫描本页二维码下载。

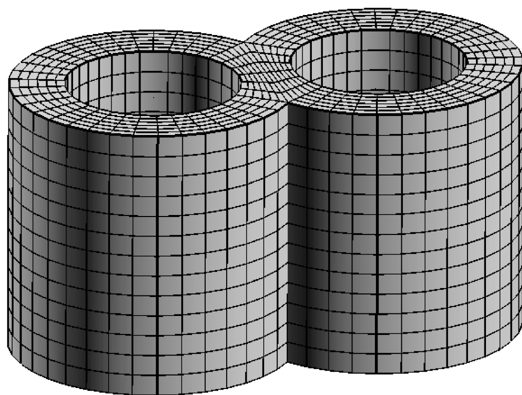
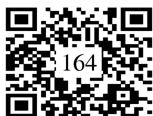


图 6-2　适应性网格技术使用的基础网格

6.2.2　相关设定

在第 3 章介绍的与时间无关的流场计算任务的基础上，添加适应性网格技术的相关设定。建立 ADP_01 仿真任务，并将 TSE_msh_corase. msh 文件放置到 msh 文件对应的文件树位置，再把第 3 章稳态任务所使用的 dat 文件复制到文件树的指定位置。也可通过扫描本页二维码下载名为 dat_for_time_independent-problem 的 dat 文件。双击 dat 文件，启动 Polydata，以添加适应性网格的相关设定㊀。

㊀ 启动 Polydata 时，可能会出现 msh 文件和 dat 文件不匹配的情况。多数情况下是因为对于固定的 dat 文件，msh 文件中流体区域和运动部件区域的顺序、各个区域中边界的顺序发生了变化。如果出现类似问题，建议在 FieldView 里检查边界的设定，在 Polyfuse 里检查区域的顺序，或者删除 dat 文件后重新设定。



在如图 6-3 所示的 Polydata 设定页面中，选择 F. E. M Task 1 选项，进入如图 6-4 所示的 F. E. M Task 1 设定页面。单击其中的 Numerical parameters 选项，进入如图 6-5 所示的 Numerical parameters 设定页面。单击其中的 Adaptive meshing（适应性网格）选项，进入适应性网格设定页面，如图 6-6 所示。

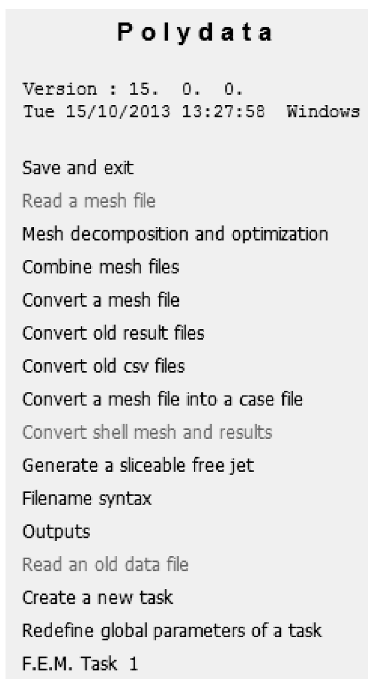


图 6-3　Polydata 设定页面

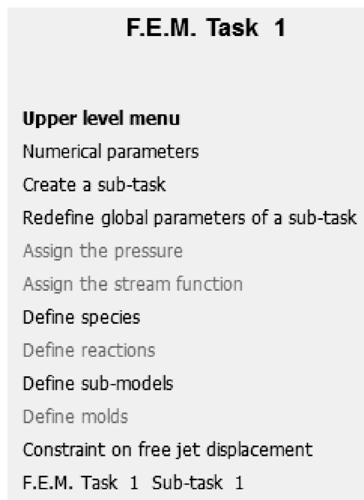


图 6-4　F. E. M Task 1 设定页面

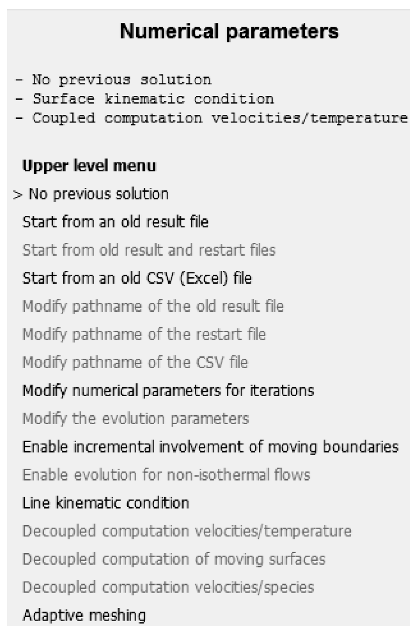


图 6-5　Numerical parameters 设定页面

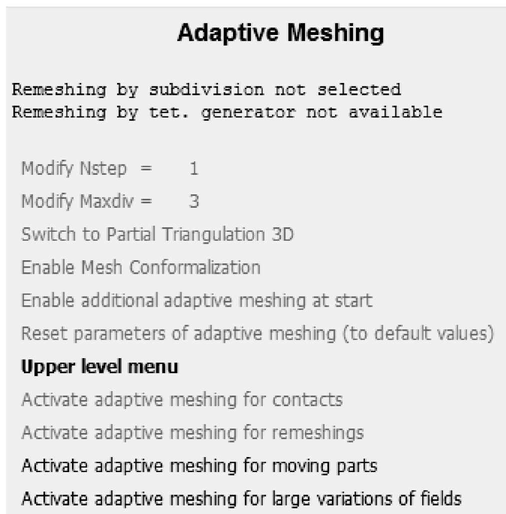
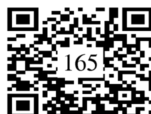


图 6-6　适应性网格设定页面



在适应性网格设定页面中包括两个可选选项：Activate adaptive meshing for moving parts（对运动部件激活适应性网格技术）和 Activate adaptive meshing for large variations of fields（对变化大的场激活适应性网格技术）。其中第一选项适用于有运动部件且采用网格重叠技术的问题。第二个选项适用于场量变化梯度较大的流场问题。本例中，单击其中第一个选项，进入如图 6-7 所示的 Global criteria for moving parts 页面。单击其中的 Enable all the local criteria 选项，对两个运动部件均使用适用性网格技术。启动后，图 6-7 中的灰色选项变为如图 6-8 所示的黑色可选选项。其中有两个切换选项：Switch to calculated from variation of inside

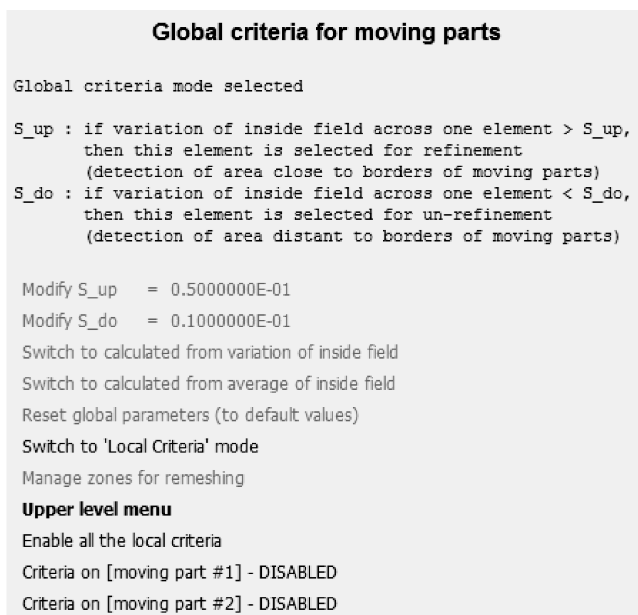


图 6-7　Global criteria for moving parts 页面（激活前）

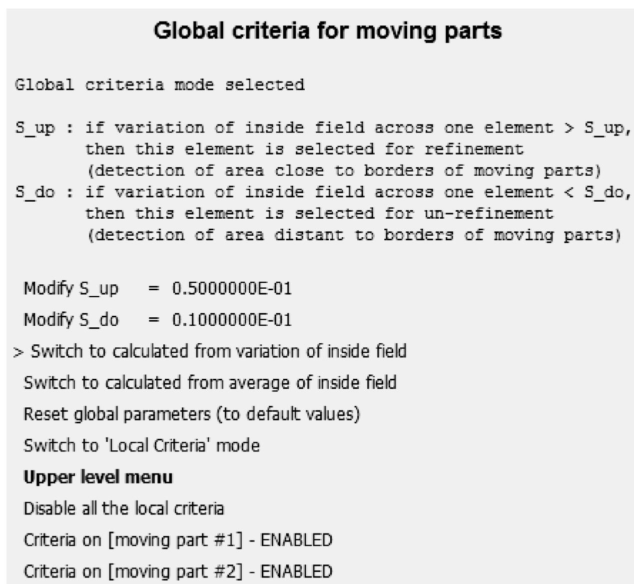
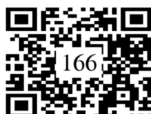


图 6-8　Global criteria for moving parts 页面（激活后）



field 和 Switch to calculated from average of inside field。第一个是根据 inside 场值的变化进行计算，第二个是根据 inside 场平均值的变化进行计算。本例中选择第一种方法。感兴趣的读者可以分析一下这两个参数变化所带来的计算结果的差异。该页面中包含了 6.1.3 节中提到的 Sup 和 Sdo 两个参数，保持这两个参数为默认数值。设定完成后，返回如图 6-9 所示的适应性网格设定页面。与图 6-6 相比，其中三个原为灰色的选项变成了黑色的可选选项，包括 Modify Nstep（编辑进行适应性网格计算的瞬态或演变问题的间隔步长）、Modify Maxdiv（编辑在进行适应性网格计算时网格细化的次数）和 Reset parameters of adaptive meshing（to default values）（重置适应性网格算法参数）。

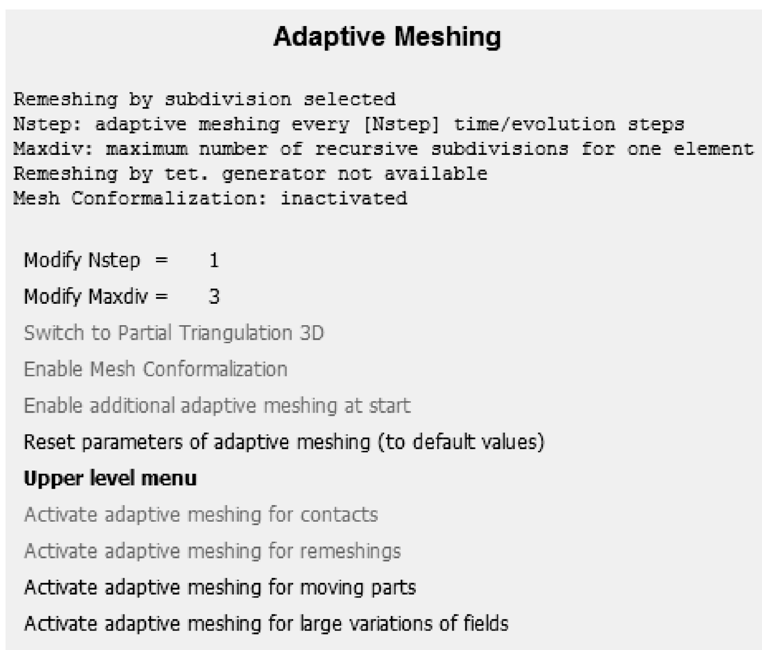
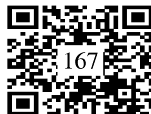


图 6-9　适应性网格设定页面

图 6-9 中，选项 Modify Nstep 表示网格细化的频率。对于使用网格重叠技术的流场计算问题来说，每一步运动部件的位置都会发生变化，所以每一步都要进行网格细化，所以该值为 1。选项 Modify Maxdiv 表示每次网格细化时每一个涉及被细化的单元的细分次数，这个参数将作为后文的研究内容，从 1 开始一直增加到 3，以观察流场结果的差异，当前将其设定为 1。完成设定后，进入如图 6-10 所示的 Outputs 页面。在现有基础上再多选择 CSV（Excel）类型输出[⊖]，所有输出类型如图 6-11 所示。

设定完成后，运行 Polyflow 进行计算，为了提高计算速度，可以考虑使用多核并行计算。

⊖ CSV（Excel）类型的输出文件可用于输出结果的格式转换。因为使用适应性网格技术后，所得的 Polyflow 类型结果将不支持混合任务的计算，所以需要利用 CSV 类型的结果进行格式转换，转换步骤见 6.3 节。



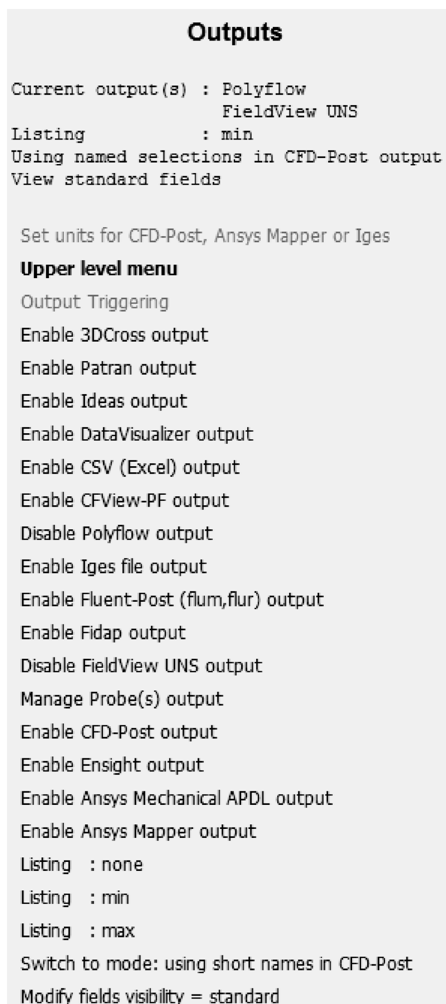


图 6-10　Outputs 页面

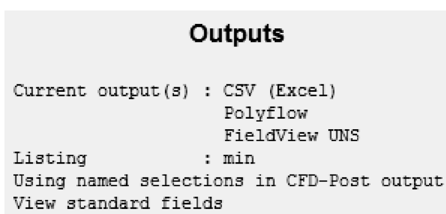
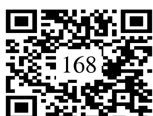


图 6-11　Outputs 的最终状态

6.3　由 CSV 类型文件转换获得 Polyflow 类型文件

本节讲述由 CSV 类型文件转换获得 Polyflow 类型文件的相关设定方法。转换后获得的 Polyflow 类型文件可用于 mixing 类型任务的计算。在 Polyman 中建立新的仿真，命名为



CSV2RES，文件树如图 6-12 所示。将名为 TES_msh_corase. msh 的网格文件复制到文件树中 Mesh 文件的对应位置⊖。

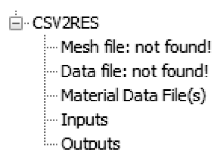


图 6-12　文件树

双击 msh 文件，进入如图 6-13 所示的 Polydata 设定页面。单击 Convert old csv files 选项，进入如图 6-14 所示的转换已有 CSV 文件页面，将 CSV 文件转换为所需格式。

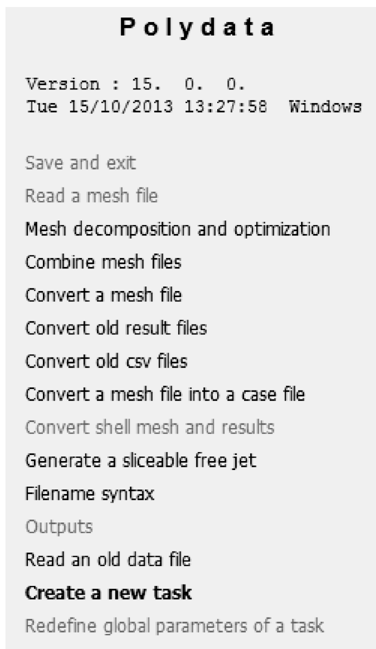


图 6-13　Polydata 设定页面

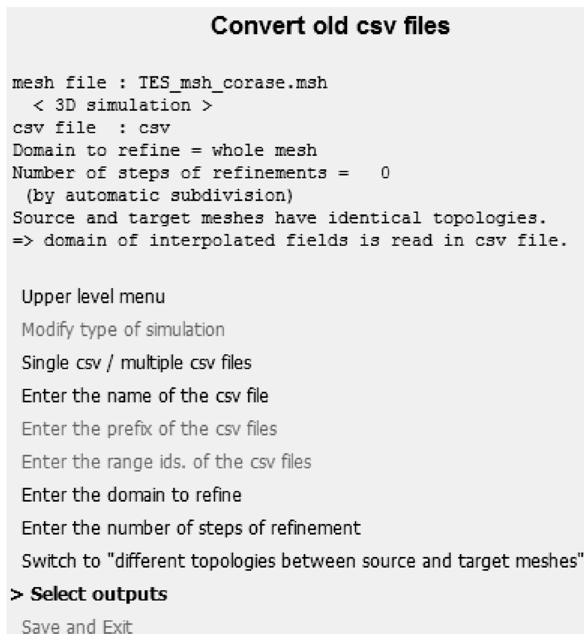
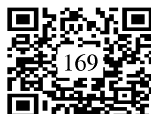


图 6-14　转换已有 CSV 文件页面

6. 3. 1　转换数量的切换

图 6-14 中的 Single csv / multiple csv files 选项是转换单个或多个 CSV 文件的切换选项，本例中只有一个 CSV 文件，保持图 6-14 所示的单个 CSV 文件状态。当对应结果文件中包含多个 CSV 文件，其扩展名为序号 1 ~ N 时，需要单击图 6-14 中的 Single csv / multiple csv files 选项，将页面转换到多个文件转换状态（见图 6-15）。与图 6-14 对比，两个原本为灰色的选项变为黑色的可选选项。其中通过 Enter the prefix of the csv files 选项指定待转换 CSV 文件，单击 Enter the range ids. of the csv files 选项，输入待转换 CSV 文件的数量。相应的选定状态也发生了变化。

⊖　这一步使用的网格文件为流场计算时使用的 msh 文件。



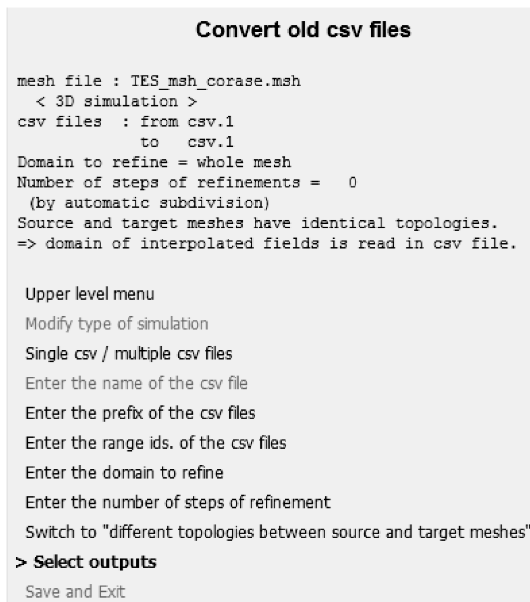


图 6-15　切换为多个文件转换状态后的 CSV 文件转换页面

6.3.2　被转换文件的选择

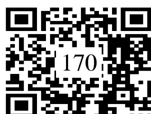
单击图 6-14 中的 Enter the name of the csv file（选定 csv 文件）选项，在打开的文件浏览器中选择 ADP_01 仿真任务 Outputs 目录中的 csv. 1 文件。

6.3.3　计算区域的选择

单击图 6-14 中的 Enter the domain to refine（定义细化区域）选项，进入如图 6-16 所示的细化区域选择页面。将运动部件区域 Add sdom re2 和 Add sdom req 放到待选区后，在选定区中保留名为 fluid. 1 的流体区域。



图 6-16　细化区域选择页面



6.3.4　网格细化次数的设定

单击图 6-14 中的 Enter the number of steps of refinement（设定细化次数）选项，打开如图 6-17 所示的细化次数设定对话框。在 New value 栏中输入数值 1。要注意，该数值与适应性网格设定中的 Maxdiv 参数是一致的。

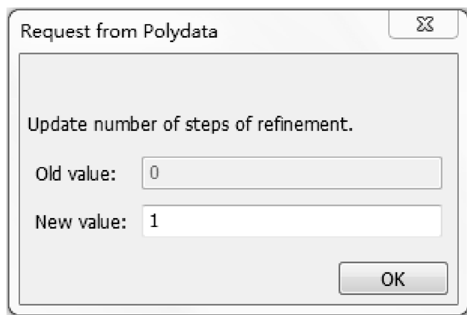


图 6-17　细化次数设定对话框

6.3.5　拓扑关系

图 6-14 中的 Switch to " different topologies between source and target meshes" 选项为切换选项，其默认状态是保持原网格和目标网格具有相同的拓扑关系，即所有插值场变量对应区域与 CSV 文件内的区域一致。单击该选项，可将状态切换为原网格和目标网格具有不同的拓扑关系，此时插值场对应区域与细化后的区域不同。本例中保持默认选项⊖。

6.3.6　输出结果类型

单击图 6-14 中的 Select outputs 选项，进入如图 6-18 所示的输出类型设定页面。选择 Polyflow 和 FieldView UNS 两类结果。

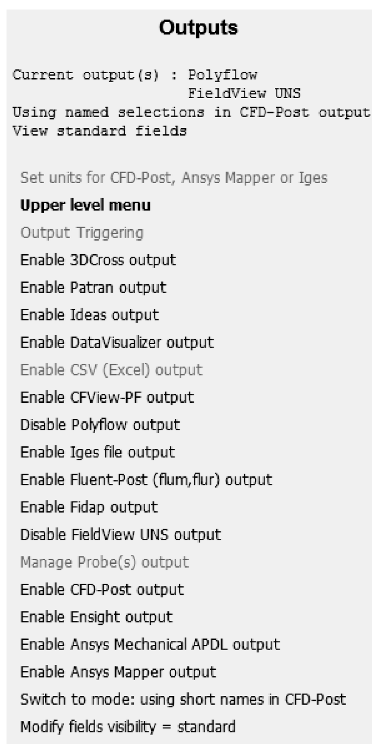


图 6-18　输出类型设定页面（设定后的状态）

⊖　该选项不应选择。如果已经选择，需要再次单击以回到图 6-14 所示的状态。



6.3.7 保存和退出

完成上述设置后，图 6-14 中原本为灰色不可选状态的 Save and Exit 选项变为黑色可选状态。单击该选项，逐步保存并退出设定。期间会进入如图 6-19 所示的场量管理页面，选择所需转换的场量。对于所需场量需要精心选择，一方面，当前系统只支持 10 个场量的转换；另一方面，由于一个六面体单元将被分为 8 个六面体单元，对应节点数从 8 个变为 27 个，故存储空间要求增长迅速。单击对应的 Do not view field ××选项，将不需要的场关闭。在如图 6-20 所示的文件管理页面中可以对输出文件进行命名，这里保持默认。

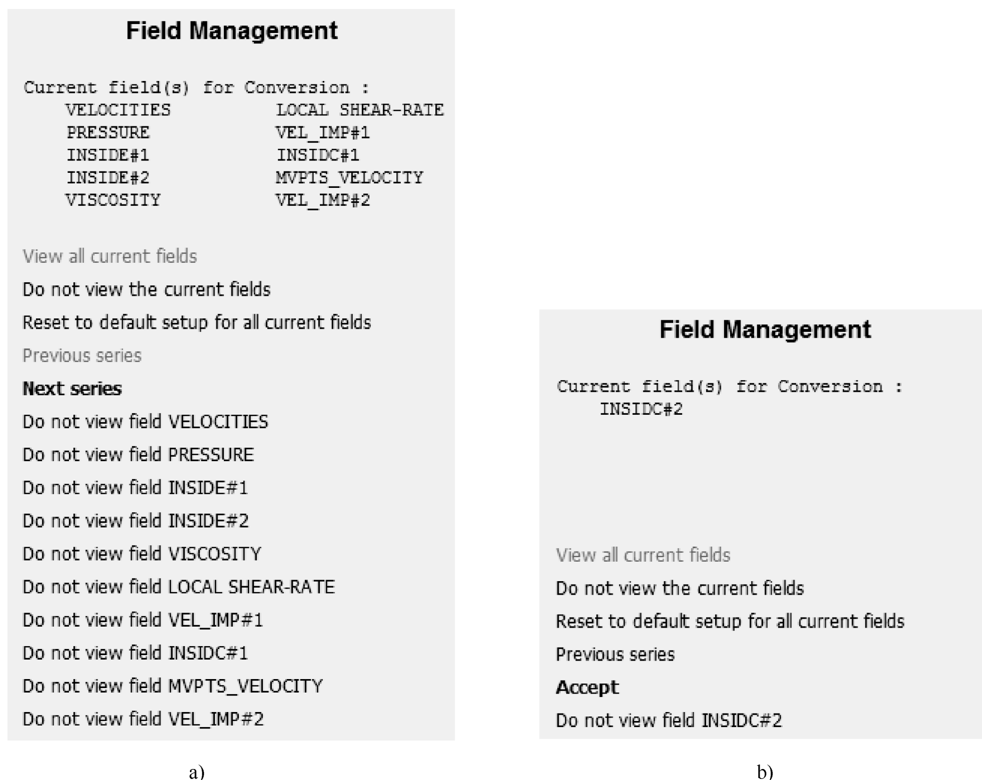


图 6-19 场量管理页面

a）第一页 b）第二页

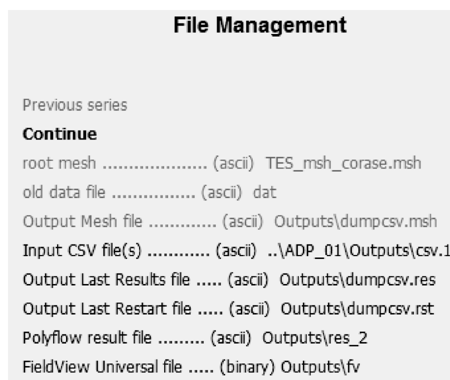
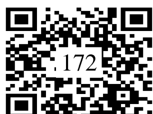


图 6-20 文件管理页面



6.3.8　转换结果

运行计算后，CSV2RES 仿真任务的文件树如图 6-21 所示，其中包括名为 res_2.1 的 Polyflow 类型文件和名为 fv1.uns 的 FieldView 类型文件。开启该仿真任务对应的 Outputs 文件夹，可以找到名为 dumpcsv.msh、dumpcsv.rst 和 dumpcsv.res 的网格文件、重新启动文件以及结果文件。

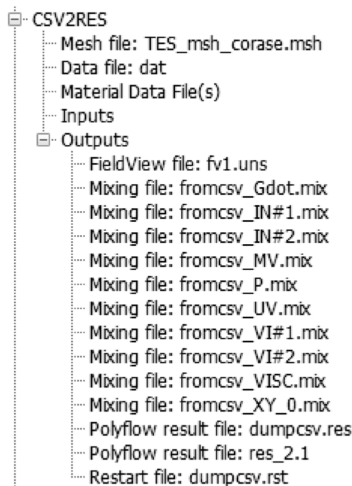


图 6-21　CSV2RES 仿真任务文件树

6.4　混合任务的设定

在完成结果文件转换并得到 Polyflow 类型的文件后，才能进行混合任务的设定。新建名为 mixing_adp 的仿真任务。将 6.3.8 节中提及的名为 dumpcsv.msh 的网格文件通过导入的方式放入该仿真任务中⊖。选中文件树中的仿真任务名 mixing_adp，单击 Polyman 窗口中的 File 菜单→import 子菜单→polyflow mesh 选项。在打开的文件浏览器中找到 dumpcsv.msh 文件。mixing_adp 仿真任务的文件树如图 6-22 所示。双击 msh 文件，启动 Polydata 进行混合任务的设定。具体过程参考本书第 4 章的相关内容，这里不再赘述。

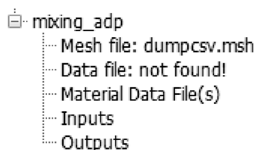


图 6-22　mixing_adp 仿真任务文件树

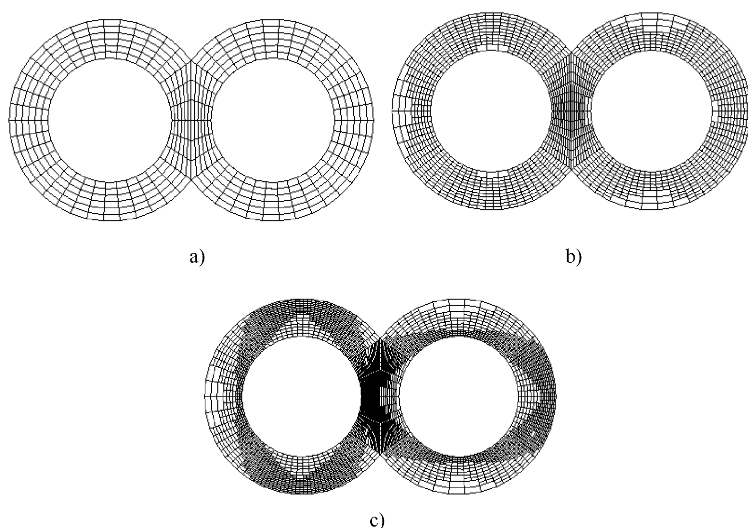
6.5　结果分析

本节将分析网格细化次数对计算结果的影响。将 Maxdiv 参数设定为 1、2 和 3，并考虑

⊖ 在使用了适应性网格技术后的流场结果中，网格已经进行了局部细化。但是 TES_msh_corase.msh 文件中的网格数据并没有被细化。该网格文件已经和流场结果不匹配。在进行 CSV 文件转换后，流场中的所有单元全部进行插值细化。8 节点六面体单元全部转换为 8 个小单元（参数 Maxdiv 等于 1）。其相应的 dumpcsv.msh 也得到了细化，即 dumpcsv.msh 文件与转换后的结果文件相匹配。



不进行网格细化的情况。下面将原粗糙网格计算结果与细化后所得网格计算结果进行对比。图 6-23 所示为端面网格的对比。可见，随 Maxdiv 的增加，端面网格越来越细化。值得注意的是，由于内存不足的问题，Maxdiv 参数等于 3 时，无法得到计算结果⊖。



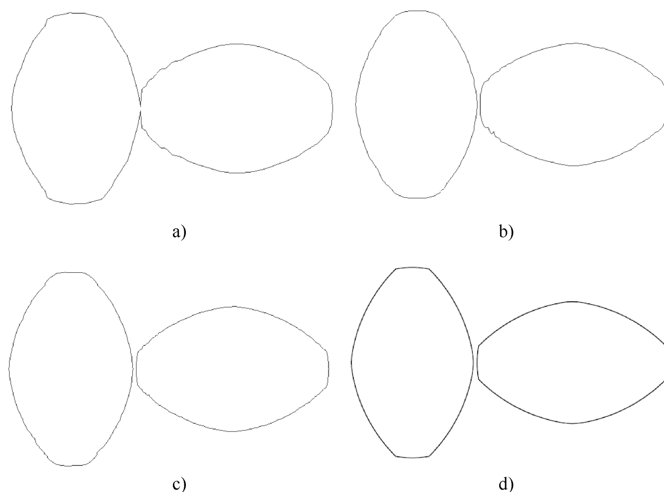
a)　　b)

c)

图 6-23　网格细化后的端面网格

a）不进行网格细化　b）Maxdiv = 1　c）Maxdiv = 2

图 6-24 所示分析了网格细分次数增加后运动部件轮廓的清晰程度。从图 6-24a 中可以看出，在没有进行细化时，运动部件轮廓交叉，无法正确体现二者之间的间隙。当 Maxdiv = 1 时，运动部件轮廓基本清晰，但是轮廓边缘不光滑。当 Maxdiv = 2 时，运动部件轮廓更加清晰，但是与实际轮廓还有一定差距。由此可见，在使用网格重叠技术时，依靠适应性网格技术可以提高运动部件轮廓的清晰度，但是与实际轮廓之间的差异很难完全消除。



a)　　b)

c)　　d)

图 6-24　网格细化后的轮廓

a）不进行网格细化　b）Maxdiv = 1　c）Maxdiv = 2　d）实际轮廓

⊖　用于计算的计算机内存为 16GB。



从图 6-25 中可以看出，随着 Maxdiv 的增加，外壁面上的剪切速率分布趋于合理。当不

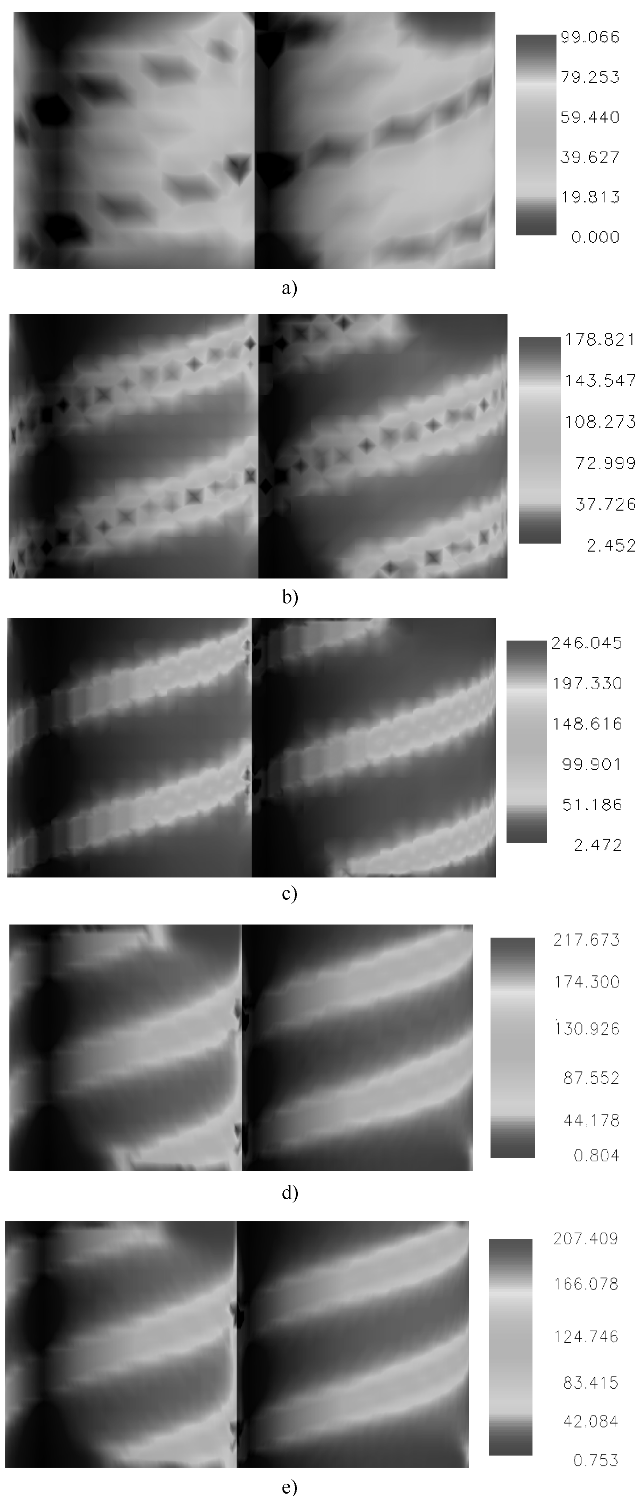
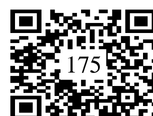


图 6-25　剪切速率分布

a）不进行网格细化　b）Maxdiv = 1　c）Maxdiv = 2　d）第 2 章网格计算结果　e）第 2 章网格计算结果 +　Maxdiv = 1

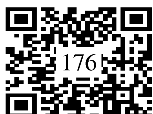


进行网格细化时（见图6-25a），虽然能够看出螺棱对应位置剪切速率较大的趋势，但其分布状态是不正确的。当Maxdiv =1 时（见图6-25b），螺棱位置剪切速率更加清晰，但是从分布图上还是可以看出不连续的分布状态，这与局部网格质量密切相关，当前质量还是不能描述分布状态。当 Maxdiv =2 时（见图6-25c），剪切速率分布情况变好，但还是可以看出在绿色带内，还有一个个不连续的黄色数值点。此外，这里还给出了应用第2 章中设计的网格计算得到的剪切速率分布结果（见图6-25d），可见使用带有边界层的网格进行计算，可以很好地描述螺棱顶部的剪切速率。为了获得精度更高的计算结果，我们在第2 章设计网格的基础上增加了细化一次的适应性网格设定，所得结果如图6-25e 所示。由于网格中包含边界层，充分考虑了螺棱与壁面之间的剪切，因此使用一次细化后的剪切速率分布并没有显著改善剪切速率的分布结果。

从表6-1 中给出的数据可以看出，随着网格细化次数的增加，计算所需的内存和计算时间呈指数增长。为了量化计算结果的正确性，我们对比了出口截面流率，可以看出，使用第2 章带有边界层的网格并进行一次网格划分的计算结果，与粗糙网格进行两次网格划分的结果，所得基本一致，故可以认为该数值接近精确解。随着 Maxdiv 参数的增加，当不进行网格细化时，由于网格过于稀疏，因此计算结果不正确，当 Maxdiv =1 时，已经能够描述出螺杆轮廓，但计算结果还存在一定误差。第2 章中带有边界层的网格直接计算也存在一定的计算误差，这是因为计算过程中螺杆元件的轮廓清晰程度没有得到提高。

表6-1　网格细化次数对计算资源和计算结果的影响

	最大内存/MB	计算时间/s	出口流率/（m^3/s）
粗糙网格	464	26.4	0.2749008×10^{-5}
粗糙网格+细化1次	1408	214.3	0.3725150×10^{-5}
粗糙网格+细化2次	5917	1523.7	0.4096115×10^{-5}
精细划分	3828	544.7	0.3879791×10^{-5}
精细划分+细化1次	12931	5679.1	0.4067872×10^{-5}



第 7 章

挤出过程中螺杆的受力状态分析

螺杆在挤出机内混合和输送物料的同时，也受到物料的反作用，从而会发生变形。通常情况下，只能获得综合考虑扭转和压缩作用下的螺杆受力状态，而无法考虑流场的影响。由于施加边界条件与实际工况有较大偏差，因此这种方法所获得的计算结果与螺杆实际的受力状态存在较大差异。幸运的是，在使用 Polyflow 提供的网格重叠技术时，在流场计算的基础上增加运动部件弹性后处理子任务，就可以获得在加工物料时运动部件的应力分布状态和变形状态。

7.1　求解前的准备

7.1.1　运动部件的网格文件

与普通流场计算中的螺杆元件网格不同，由于在进行受力状态分析时，需要指定固定边界和运动部件边界，因此螺杆元件区域边界不能全部合并到一起。在前处理环节中，将每个螺杆元件都划分为四组边界，分别为两个端面、与物料接触的螺旋表面和内孔圆柱面（详见 2.2.4 节）。

7.1.2　运动部件的边界条件

在螺杆元件受力分析后处理子任务中，需要指定固定边界和运动部件边界。本节中，指定入口端螺杆元件端面为固定边界，不发生变形（即 dn = ds = 0）。另外，螺杆螺旋表面、内孔圆柱面和出口端螺杆元件端面均指定为（Moving part border）运动部件边界。

7.1.3　强度理论和物性参数

Polyflow 使用线弹性理论计算运动部件的变形和应力张量。本节中使用应力张量的三个特征量 σ_1、σ_2 和 σ_3 来进行应力分析，运动部件所受应力表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} < [\sigma] \tag{7-1}$$

式中，[σ] 为许用应力，螺杆材质为 38CrMoAlA，其屈服极限为 835MPa。

模拟中还需给定物料的弹性参数：杨氏模量和泊松比分别设定为 2×10^{11} Pa 和 0.25。



7.2　运动部件弹性变形后处理子任务的设定

在 Polyman 窗口中单击工具栏中的新建仿真任务按钮 S，新建一个名为 elastic_deformation_screw 的仿真任务，并将稳态任务 TSE_time_indep_iso 中使用的 msh 和 dat 文件复制到文件树指定位置，如图 7-1 所示。双击文件树中的 msh 文件，打开如图 7-2 所示的 Polydata 设定页面。单击 F. E. M Task 1 选项，进入如图 7-3 所示的有限元任务 1 设定页面。单击 Create a sub-task（创建子任务）选项后，系统提示是否复制现有子任务的数据（见图 7-4）。由于现有子任务和新建子任务之间没有相似性，因此单击 No 按钮，进入如图 7-5 所示的创建子任务页面。单击其中的 Postprocessor of Elasticity（isothermal）（等温弹性后处理）选项，将子任务命名为 screw1 后，进入如图 7-6 所示的 screw1 子任务设定页面。

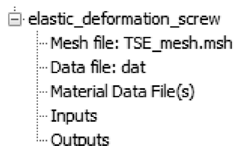


图 7-1　仿真文件树

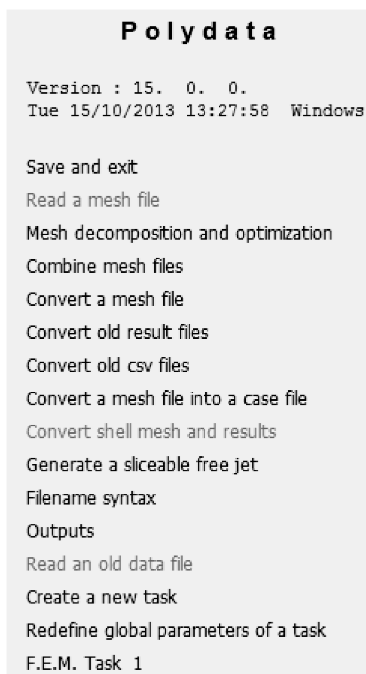


图 7-2　Polydata 设定页面

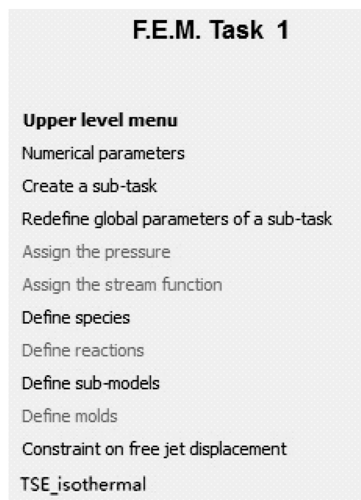


图 7-3　有限元任务 1 设定页面

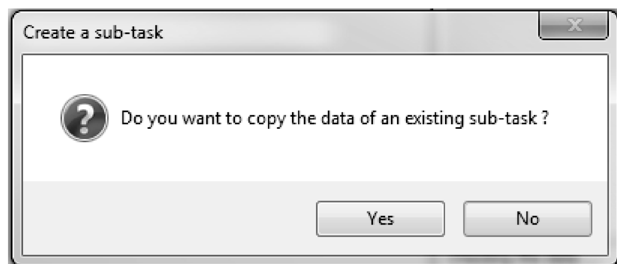


图 7-4　系统关于是否复制现有子任务数据的提示



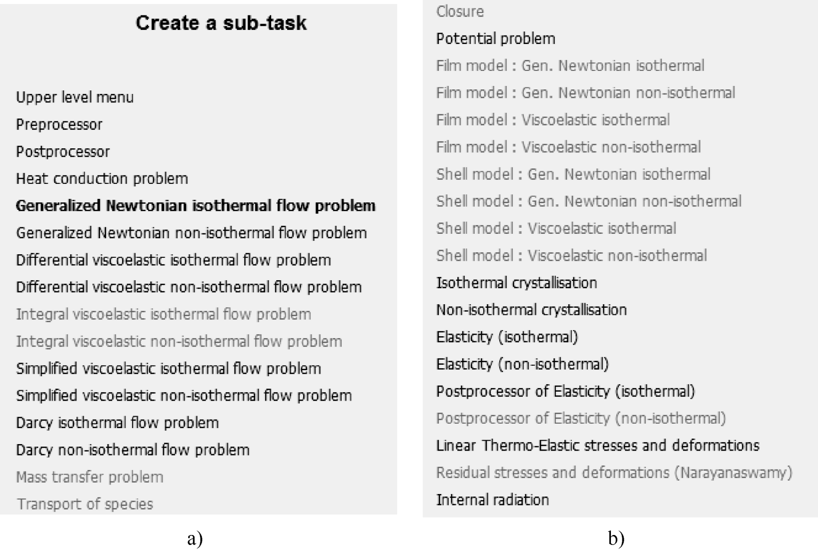


图7-5　创建子任务页面

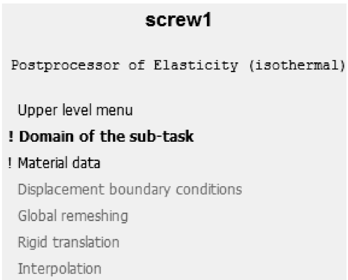


图7-6　screw1子任务设定页面

7.2.1　子任务计算区域的设定

单击图7-6中的! Domain of the sub-task（子任务区域设定）选项，进入如图7-7所示的

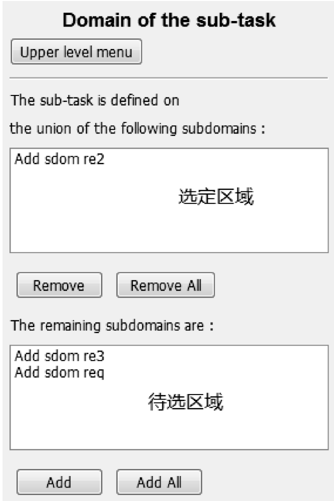
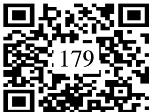


图7-7　子任务计算区域设定页面



子任务计算区域设定页面。将螺杆 1 对应的区域（Add sdom re2）放置在选定区域，将螺杆 2（Add sdom re3）和流体（Add sdom req）对应的区域放置到待选区。设定后单击 Upper level menu（返回上级菜单）按钮，返回如图 7-6 所示的 screw1 子任务设定页面。

7.2.2 物性参数和系统单位的设定

单击图 7-6 中的！Material data 选项，进入如图 7-8 所示的物性参数设定页面。单击其中的 Elastic data（弹性参数）选项，进入如图 7-9 所示的弹性数据设定页面。将参数 E（杨氏模量）和 Mu（泊松比）分别修改为 2×10^{11} Pa 和 0.25。设定后返回图 7-8 所示的物性参数设定页面。单击 Change System of Units（修改系统单位制）选项，进入如图 7-10 所示的修改系统单位页面。单击其中的！Define current system of Units（定义当前系统单位制）选项，进入如图 7-11 所示的当前系统单位制设定页面。从该页面中可以看出，当前单位制均为国际制单位。保持默认单位制，单击 Upper level menu 选项，退出单位制设定页面。连续退出，返回图 7-6 所示的 screw1 子任务设定页面。

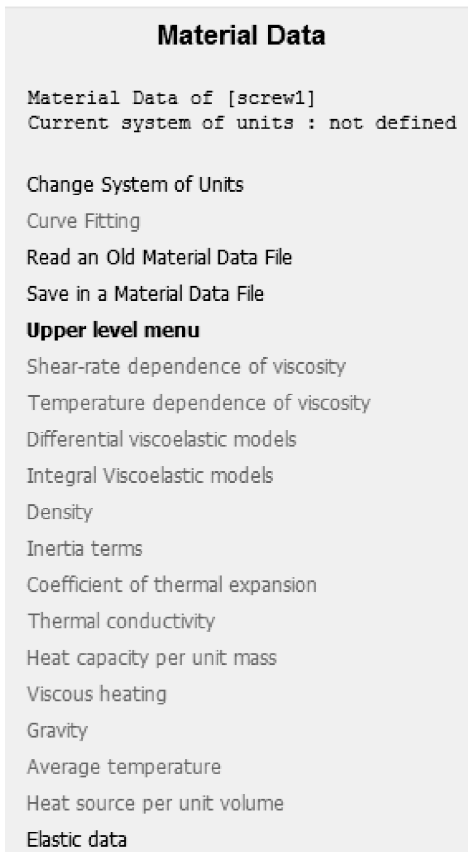


图 7-8 物性参数设定页面

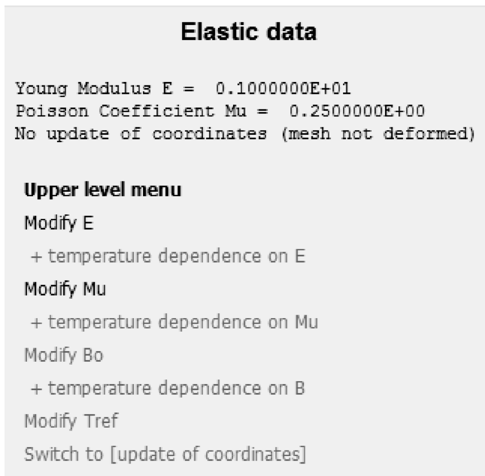
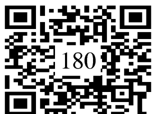


图 7-9 弹性数据设定页面



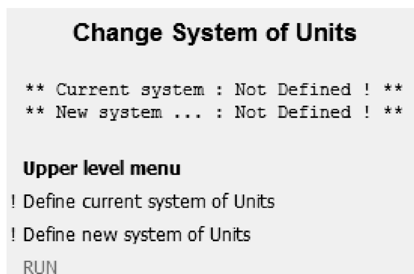


图 7-10　修改系统单位页面

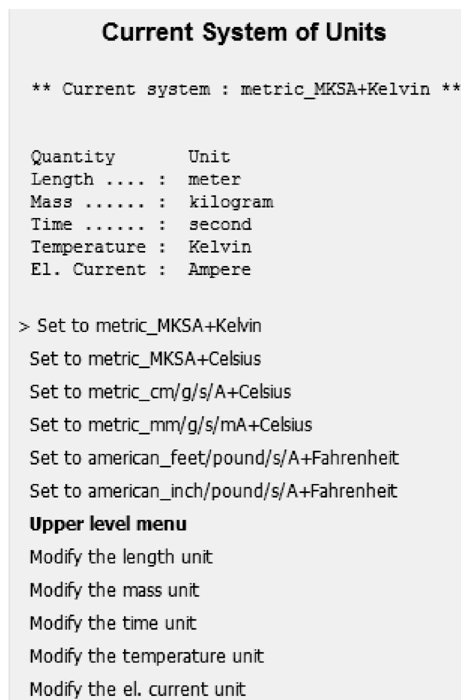


图 7-11　当前系统单位制设定页面

7.2.3　位移边界条件设定

图 7-6 中本为灰色不可选的 Displacement boundary conditions（位移边界条件）选项已经转变为黑色的可选状态。单击该选项，进入如图 7-12 所示的位移边界条件设定页面。为了区分入口和出口，单击 Polydata 窗口→Graphcial Window 菜单→Axes 选项→show axes 子选项，在图形窗口中打开坐标轴，如图 7-13 所示。沿 Z 轴方向即为挤出方向。入口边界为固定边界，不发生变形，施加法向位移 dn 和切向位移 ds 均为 0 的边界条件（即 dn = ds = 0）。分别选择另外三个边界，单击边界 Modify 按钮，在打开的如图 7-14 所示的边界条件类型选择页面中，选择 Border of a moving part（运动部件边界）选项，将其设定为运动部件轮廓边界，这类边界可传递流体的反作用力。单击该选项后出现如图 7-15 所示的系统提示对话框：对名为 ement_side. 7 的边界施加运动部件边界条件。当这一条件被选择后，当前区域将被认定为一个运动部件。弹性问题是一个主流动问题/网格重叠技术（MST）问题的后处理环节；运动部件的网格不会因为受力变形而发生变形⊖。单击 OK 按钮后，返回如图 7-16 所示的设定后的位移边界条件。使用相同的方法将名为 ement_side. 8 和 ement_side. 9 的边界也设定为

⊖ 使用该后处理子任务实际上是在使用没有发生变形的螺杆元件几何模型获得流场结果的基础上，对螺杆元件进行弹性变形计算。计算结果会包含螺杆变形的相关内容，但是，流场计算中螺杆元件的几何模型不发生变形。读者可以尝试建立变形后的螺杆元件几何模型，然后利用该模型进行流场分析。但是，从经验来分析，由于螺杆本身变形较小，以及网格重叠技术所导致的运动部件表面轮廓不清晰所带来的误差，很有可能无法准确地描述螺杆元件变形前后的流场状态的差异。



运动部件轮廓类型边界。单击 Upper level menu 按钮，返回如图 7-6 所示的 screw1 子任务设定页面。至此，针对第一个螺杆元件已经完成了计算区域、物性参数（包括单位制）和边界条件的设定。

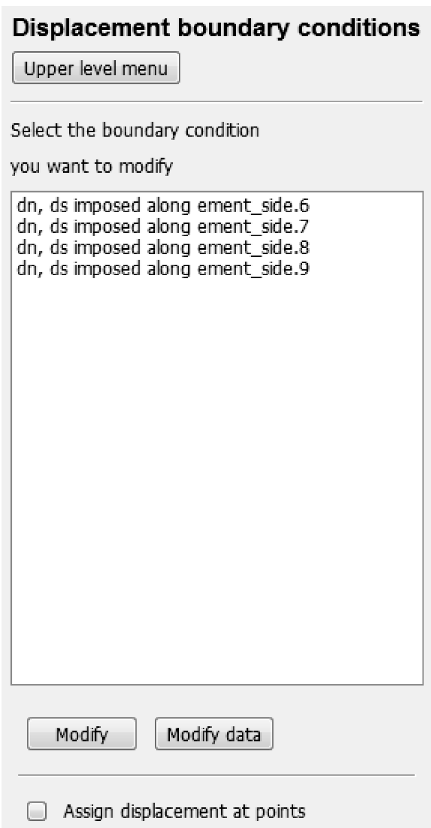


图 7-12　位移边界条件设定页面

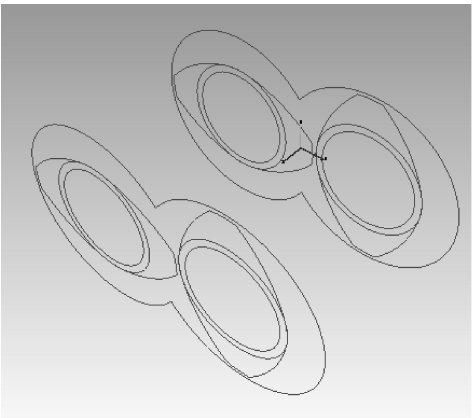


图 7-13　坐标方向

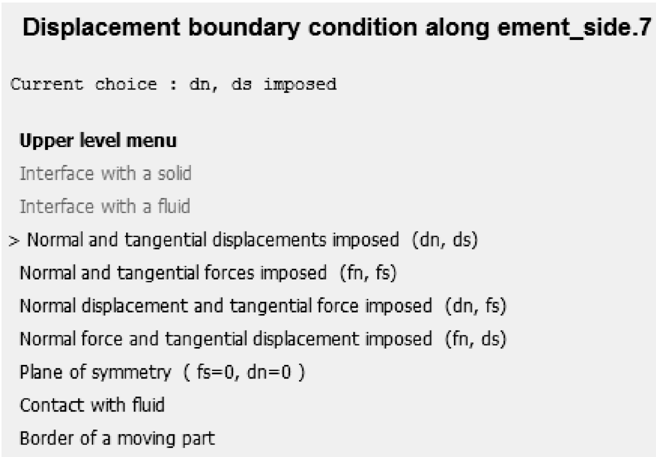
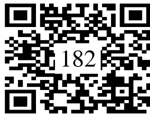


图 7-14　边界条件类型选择页面



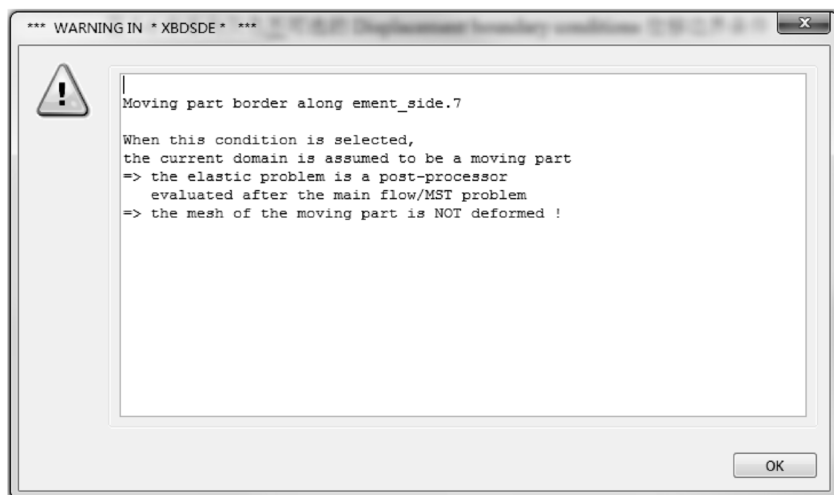


图 7-15　系统提示对话框

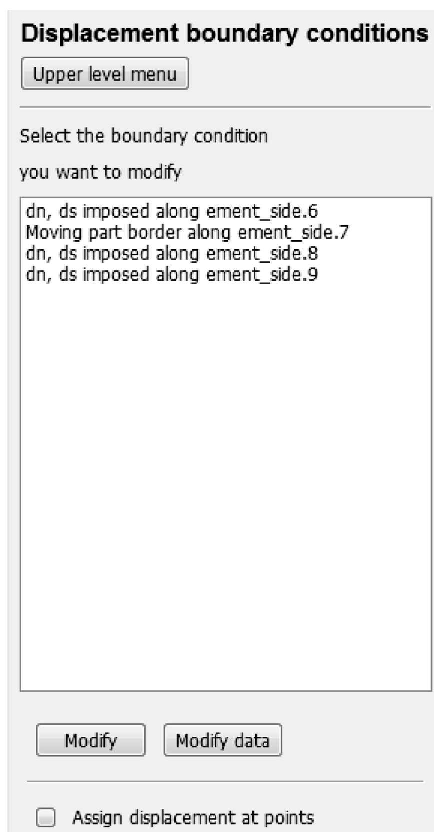
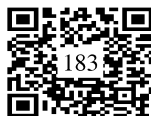


图 7-16　位移边界条件（设定后的状态）

完成 screw1 相关设定后，返回图 7-3 所示的有限元任务 1 设定页面。相比之前，已经增加了名为 screw1 的螺杆元件弹性变形后处理子任务。然后创建子任务 screw2。由于该任务与



screw1 相似，因此当系统提示是否复制现有子任务数据时，单击 Yes 按钮，并在子任务列表中选择 screw1（见图 7-17）。将其计算区域换成另外一个螺杆元件对应的计算区域（Add sdom re3）。在确定杨氏模量和泊松比等参数后，按照 screw1 子任务的模式设定 screw2 子任务的位移边界条件。完成设定后，退出 screw2 子任务的设定。随后逐步退出 Polydate 设定，运行计算。计算中可使用多核并行计算，以提高计算效率。

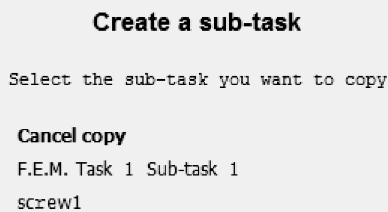


图 7-17　子任务列表

7.3　流场结果观察及结果分析

本节继续使用 FieldView 软件观察螺杆元件的应力和变形场计算结果。

7.3.1　导入结果文件

启动 FieldView 软件后，导入计算获得的 FieldView 类型结果文件。单击 File 菜单→Data input 子菜单→Unstructured 选项。在打开的文件浏览器中找到 elastic_deformation_screw 仿真任务中 Outputs 目录里的 fv1. uns 文件。在打开的如图 7-18 所示的场量列表选择对话框中，单击 Select All 按钮后，单击 OK 按钮。在打开的如图 7-19 所示的 FieldView 非结构类型数据对话框中，保持 INPUT MODE（输入模式）栏的 Replace（替换）选项为选中状态，单击 Close（关闭）按钮，关闭该对话框。

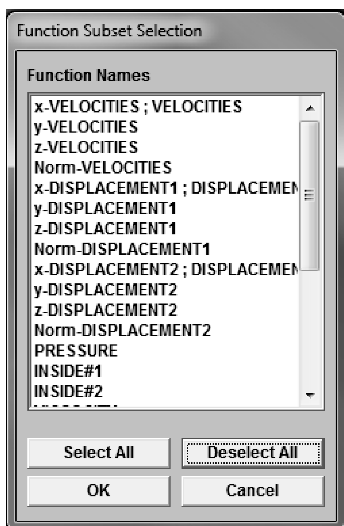


图 7-18　场量列表选择对话框

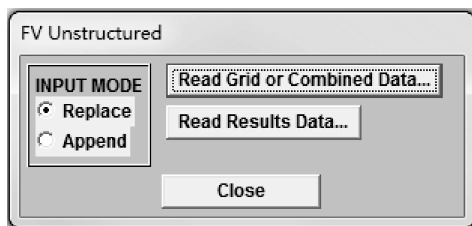


图 7-19　FieldView 非结构类型数据对话框

7.3.2　背景及显示设定

将背景颜色由默认的黑色变为白色。单击 View 菜单中的 Background Color（背景颜色）选项，在如图 7-20 所示的颜色选择对话框中单击白色按钮后，单击 OK 按钮确认，背景颜色



即转变为白色。

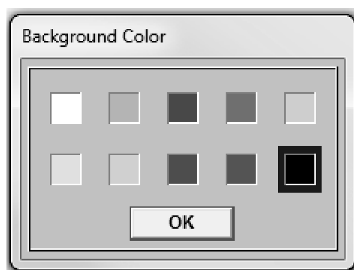


图 7-20　颜色选择对话框

将视角转换为正视模式，方法为：在 View 菜单中取消勾选 Perspective 复选框，视图将转换为正视显示模式。

将区域轮廓框关闭，方法为：在 View 菜单中取消勾选 Outline 复选框，可将区域轮廓框关闭。

7.3.3　螺杆元件应力云图显示

1. 边界云图

在 FieldView 软件窗口中，单击左侧工具栏中的边界按钮，进入如图 7-21 所示的边界显示设定对话框。该页面中包括 4 个子页面，分别为 Surface 子页面、Subset 子页面、Colormap 子页面和 Legend 子页面。

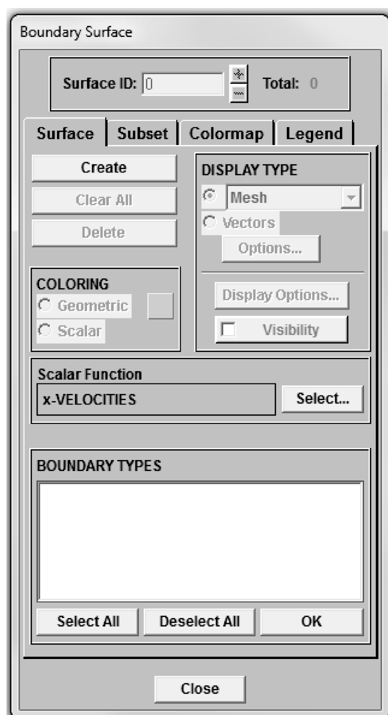
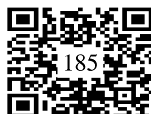


图 7-21　边界显示设定对话框



单击 Surface 子页面中的 Create 按钮，创建一个新的显示层。此时图 7-21 中的 BOUNDARY TYPES 栏中出现了所有的边界列表。如前所述，每个螺杆元件均为四个边界。选择两个螺杆元件的所有八个边界后，单击 OK 按钮。为了清晰起见，在 COLORING 栏中选中 Geometric 选项，并单击其后的颜色按钮，在打开的颜色选择对话框中单击黑色按钮后，单击 OK 按钮确认。这时图形窗口显示如图 7-22 所示，该模式为螺杆边界的纯黑色网格模式显示状态。在 DISPLAY TYPE 栏中选择第一项，并在其下拉列表框中选择 Smooth 模式。在 COLORING 栏中选中 Scalar 选项。根据式（7-1），螺杆所受应力为弹性应力张量的三个特征量的函数，现将该函数关系写入 FieldView。单击工具栏上的函数按钮 f_x，在打开的函数设定窗口（见图 7-23）中，单击 Create 按钮，进入如图 7-24 所示的公式编辑窗口。该窗口中包括四个栏目：Constants（常数）栏、Operations/Keys（操作符号和关键字）栏、Quantities（数据）栏和 Formula（公式）栏。在 Quantities 栏中查找到弹性应力张量的三个特征量所对应的名称为 ELAST_EIGENV_1、ELAST_EIGENV_2 和 ELAST_EIGENV_3 的三个变量。在 Formula 栏中根据式（7-1）输入如下代码：

```
(0.5* (("ELAST_EIGENV_1" -" ELAST_EIGENV_2") ^2 + (" ELAST_EIGENV_2" -" ELAST_EIGENV_3")
^2 + (" ELAST_EIGENV_3" -" ELAST_EIGENV_1") ^2)) ^0.5
```

并将该公式计算得到的变量命名为 stress。返回图 7-21 所示的边界显示设定对话框的 Surface 子页面，单击其中的 Scalar Function（标量方程）栏中的 Select 按钮，在打开的变量列表窗口（见图 7-25）中选择刚刚建立的 stress，单击 Calculate 按钮，关闭变量列表窗口。此时，图形显示如图 7-26 所示。

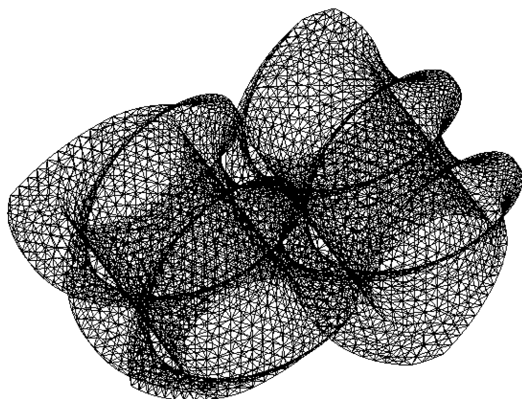


图 7-22　图形窗口显示状态 1

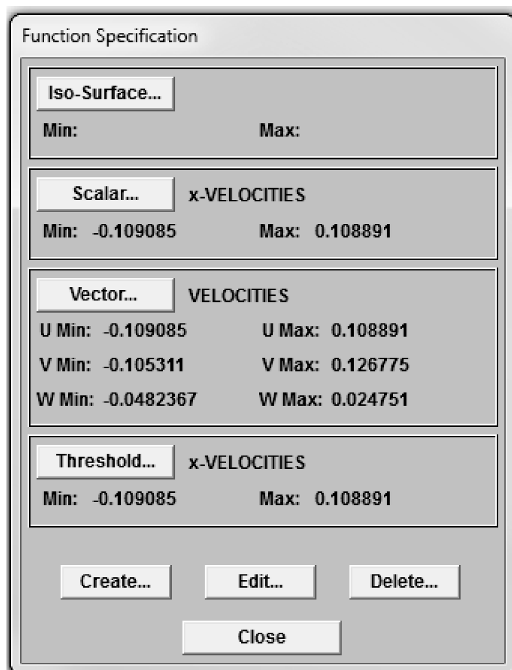
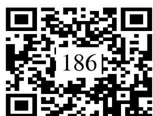


图 7-23　函数设定窗口



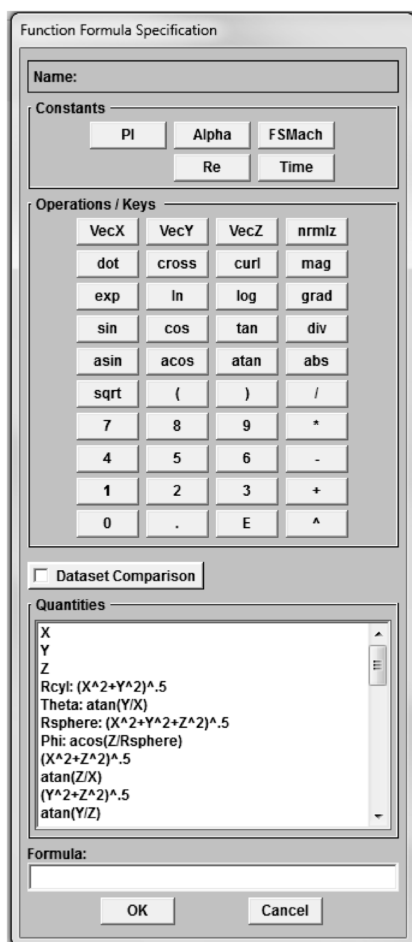


图 7-24　公式编辑窗口

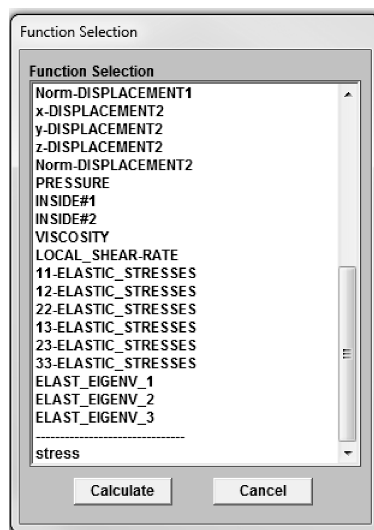


图 7-25　变量列表窗口

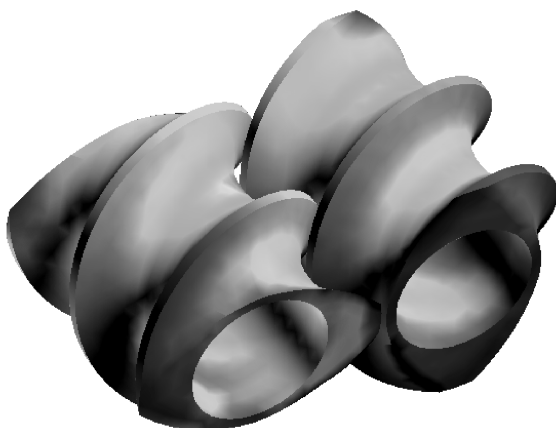


图 7-26　图形窗口显示状态 2



2. 图例颜色列表设定

进入 Legend 子页面（见图 7-27），在该页面中对颜色列表进行设定。勾选 Show Legend 复选框，并保持选中 LEGEND TYPE 栏中的 Spectrum（色谱类型）选项。在 DISPLAY AS 栏中保持选中 Color Bar 选项，并将 Number of Labels 栏中数值的个数由 2 改写为 6，单击其下的向右箭头，可将颜色列表放大到适当大小。在 LABELS 栏中设置颜色列表中数值的颜色为黑色。Font（字体）栏中保持默认字体。在 LEGEND TEXT 栏中包括两种数值显示方式：Floating Point（浮点数）和 Exponential（科学计数法）。小数点后位数（Decimal Places）默认为 3。在 Size 栏中可以设置字号大小，将默认值由 10 修改为 12。按住〈Shift〉键，同时使用鼠标左键将颜色列表拖放到图形窗口中的适当位置㊀。

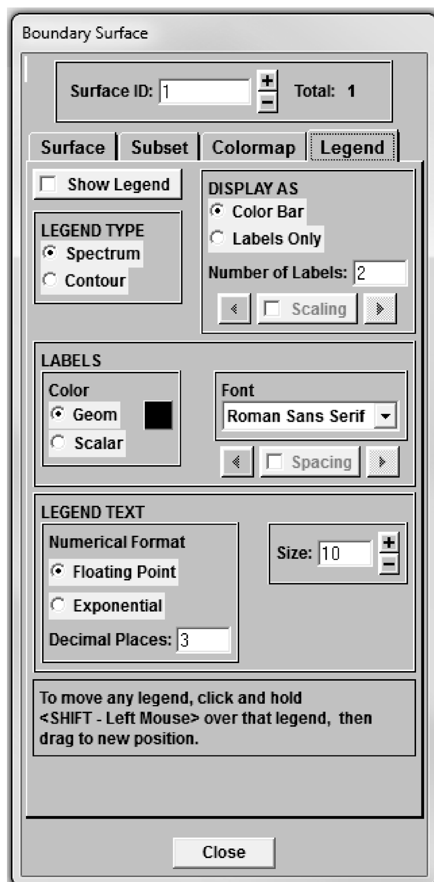


图 7-27　Legend 子页面

在 Colormap 子页面中（见图 7-28），在 SCALAR COLORING（标量颜色显示范围）栏中勾选 Local 复选框。这时，标量颜色范围由全部区域数值范围转变为显示区域的数值范围。对比勾选前后，本例中上限保持不变，下限由 0 提高到“2.04395e+004”（单位为 Pa）。图

㊀ FieldView 图形窗口的鼠标使用方法：左键为平移键，右键为缩放键，中键为旋转键；使用〈Shift + 鼠标左键〉可移动颜色列表。



形窗口的颜色也发生了变化，对比图 7-29 和图 7-26。

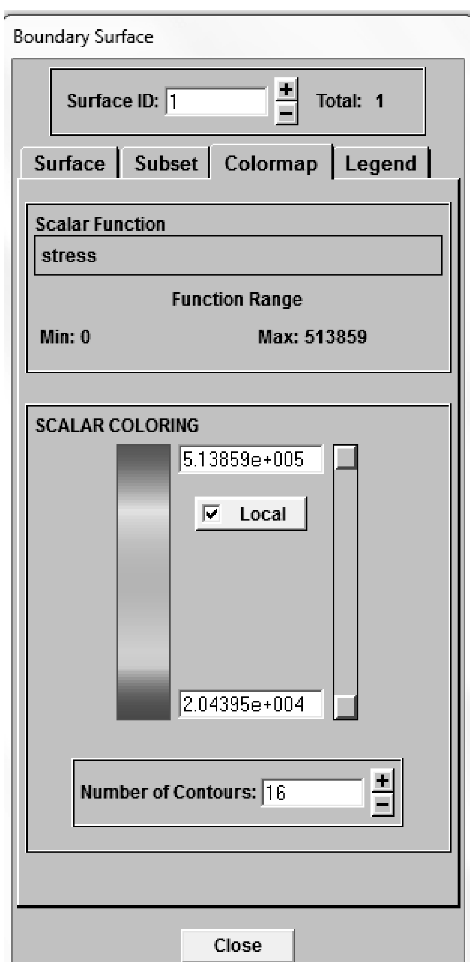


图 7-28　Colormap 子页面

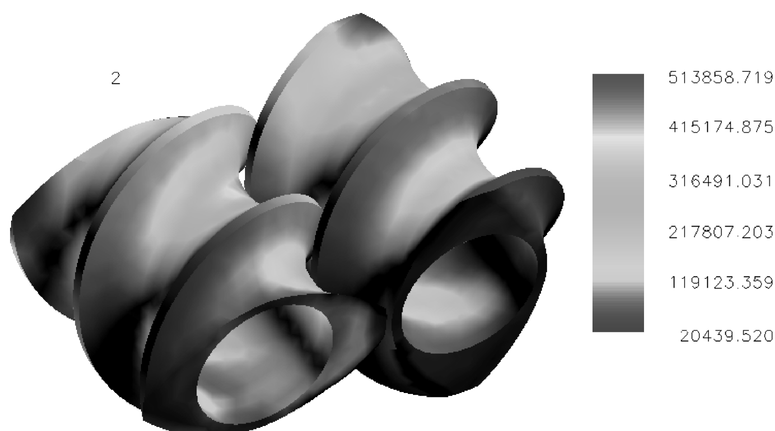
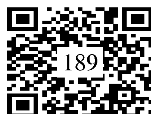


图 7-29　图形窗口显示状态 3



3. 视角设定

单击工具栏中的视图方向设定按钮，打开如图7-30所示的视图方向设定页面。单击其中的+Y按钮，将视图放置成如图7-31所示的方向。从图7-31可知，螺杆所受最大应力为0.514MPa，远远小于材料的许用应力数值。最大应力发生在右螺杆的螺槽底部。

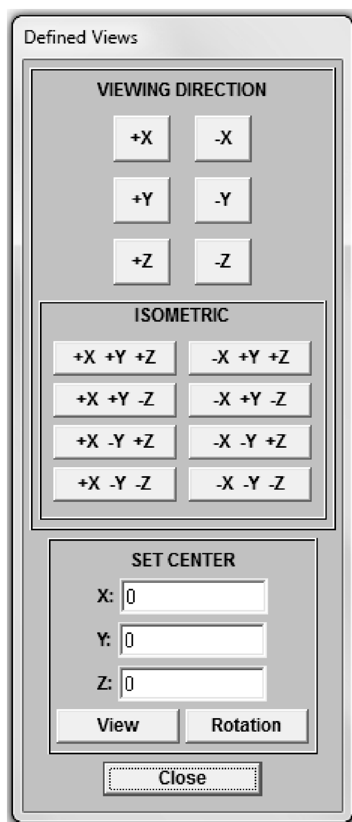


图7-30　视图方向设定页面

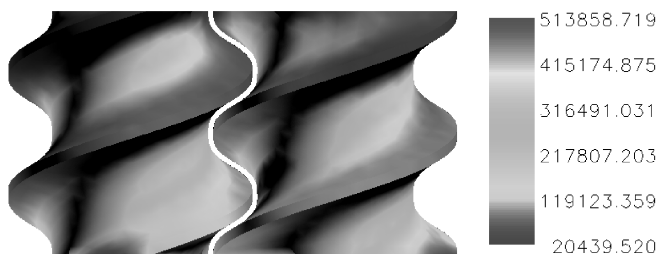
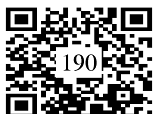


图7-31　图形窗口显示状态4-螺杆应力分布状态

7.3.4　螺杆元件变形显示设定

返回边界显示设定对话框（见图7-21），进入Surface子页面，单击Clear All按钮，删



除现有显示设定。然后单击 Create 按钮，重新建立显示设定，选择组成螺杆 1 外边界的四个边界（BS6-BS9）。设置 DISPLAY TYPE 为 Smooth 类型。设置 COLORING 为 Scalar 类型。设置 Scalar Function 为 Norm-DISPLACEMENT1。在 Legend 子页面中打开颜色数值列表，并以科学计数法的形式显示数值。图形窗口显示如图 7-32 所示。

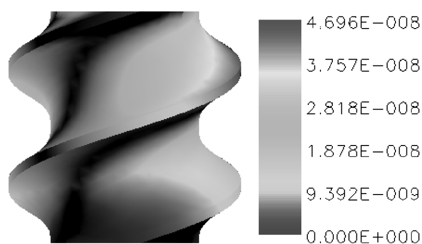


图 7-32　图形显示-螺杆 1 变形云图

返回 Surface 子页面，单击 Create 按钮，建立新的显示层。选择组成螺杆 2 外边界的四个边界（SB10-SB13），并按照螺杆 1 设定显示方式。设置 Scalar Function 为 Norm-DISPLACEMENT2，将颜色列表放置到对应螺杆元件的两侧。设定后图形显示窗口如图 7-33 所示。在物料的反作用力下，螺杆发生扭转变形。当入口端固定，靠近出口端的螺杆外径处变形最大，且两螺杆变形量不一样。



图 7-33　图形显示-螺杆 1 和螺杆 2 的变形云图



第 8 章 滑移条件和周期性边界条件

本章将对两种特殊的边界条件进行介绍。滑移条件可以分析物料与机筒或螺杆表面出现打滑时的流场特征，而周期性边界条件可以描述相同几何造型的螺杆元件串联时的流场特征。

8.1 滑移条件的使用

8.1.1 滑移条件

在实际工作过程中，某些物料并非能与螺杆和机筒粘贴到一起，所以无法满足壁面无滑移的假设条件。滑移边界条件可以解决这类问题的计算。Polydata 提供了两种途径进行滑移条件施加：一种是通过边界条件设定选择 slip boundary 滑移边界条件，另一种是在运动部件上施加滑移条件。本节讲述第二种施加方式的设定方法，并分析最大滑移应力对双螺杆的挤出特征的影响。

8.1.2 基于运动部件的滑移问题设定

1. 建立仿真任务

在 Polyman 窗口中建立名为 slip_condition 的仿真任务，并将稳态流场任务 TSE_time_independent_iso 中使用的 msh 文件和 dat 文件复制到该仿真任务的对应位置。形成的文件树如图 8-1 所示。

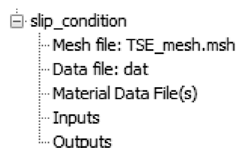


图 8-1 滑移仿真任务文件树

2. 定义运动部件页面

双击 msh 或 dat 文件，进入如图 8-2 所示的 Polydata 设定页面。单击其中的 F. E. M Task 1 选项，进入如图 8-3 所示的有限元任务 1 设定页面，对其中的运动部件进行修订。单击 TSE_isothermal 子任务选项，进入如图 8-4 所示的 TSE_ isothermal 子任务设定页面。单击其中的 Define moving parts（定义运动部件）选项，进入如图 8-5 所示的运动部件列表页面。



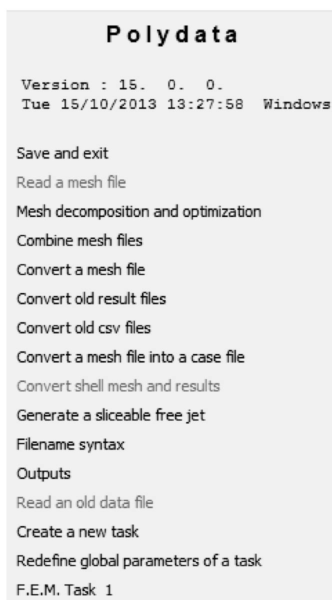


图 8-2　Polydata 设定页面

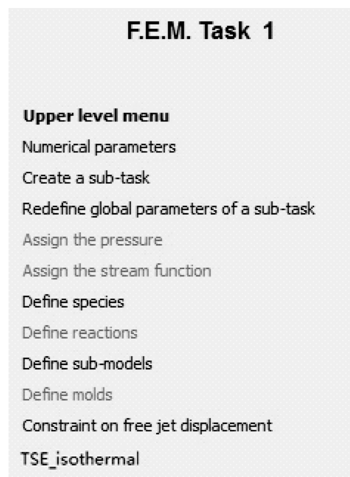


图 8-3　有限元任务 1 设定页面

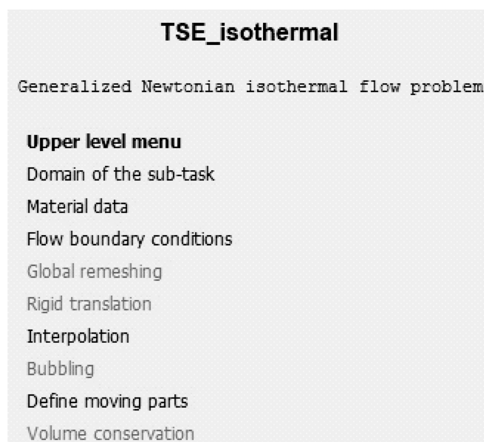


图 8-4　TSE_ isothermal 子任务设定页面

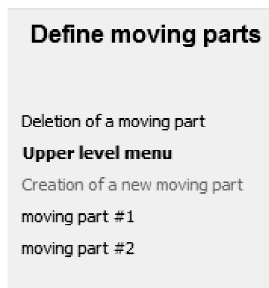


图 8-5　运动部件列表页面

3. 滑移条件的施加

对运动部件 1 进行设定，单击图 8-5 中的 moving part #1（运动部件#1）选项，进入如图 8-6 所示的运动部件#1 设定页面。保持其他选项设定不变，单击 Flow boundary conditions（流动边界条件）选项，进入如图 8-7 所示的运动部件流动边界条件设定页面。其中默认选项为沿运动部件的壁面无滑移条件。单击 Switch to slip condition 选项，切换到沿运动部件表面滑移条件设定状态（见图 8-8），原本为灰色的 Modify Slip law and coefficients 选项变为黑色可选状态。单击该选项进入如图 8-9 所示的流动边界条件设定页面，在其中设定流体与运动部件的最大摩擦应力[⊖]。本例中将研究最大滑移应力的影响，所以使用演变算法。单击

⊖ 最大滑移应力表示为产生滑移时运动部件表面的临界剪切应力。当表面剪切应力低于该数值时，不会发生滑移，当表面剪切应力高于该数值时，将发生滑移。



Polydata 工具栏中的 EVOL 按钮，启动演变参数设定模式后，在图 8-9 中单击 F(v) = bounded slipping force 选项。在打开的如图 8-10 所示的最大滑移应力输入对话框中输入常数 1。单击 OK 按钮后，系统出现如图 8-11 所示的提示：是否将当前的稳态任务类型转换为演变任务类型。单击 Yes 按钮，转变任务类型。系统转入如图 8-12 所示的最大滑移应力演变方程列表页面，将系统默认的类型修改为 f(S) = a * exp(b * S) + c + d * S 类型。最大滑移应力的最终数值将等于在图 8-10 所示的对话框中输入的数值与当前表达式计算数值的乘积。分别将参数 a、b、c 和 d 修改为 1、18.421、0 和 0。图 8-13 给出了最大滑移应力演变方程列表页面的最终状态。在退出该页面之前，再次单击 EVOL 按钮，将其从选中状态变为待选状态。随后系统给出如图 8-14 所示的关于速度插值类型强制转换的提示。由于运动部件表面施加了滑移条件，因此系统强制将速度插值调整为线性插值。同样方法将滑移条件施加到 screw2 上。

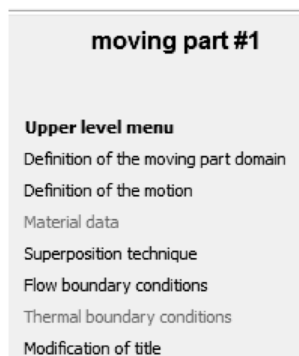


图 8-6　运动部件 1 设定页面

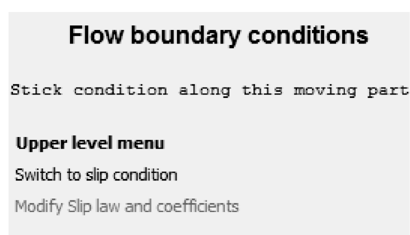


图 8-7　运动部件流动边界条件设定页面（默认状态）

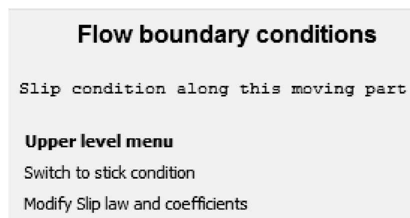


图 8-8　运动部件流动边界条件设定页面（选定后的状态）

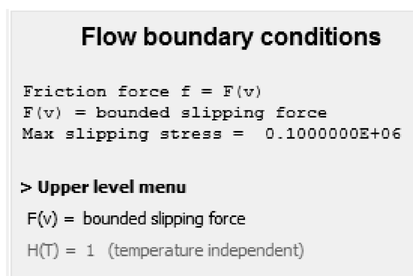


图 8-9　流动边界条件设定页面（摩擦力大小）

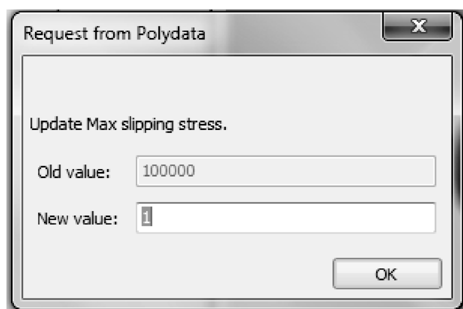


图 8-10　最大滑移应力输入对话框

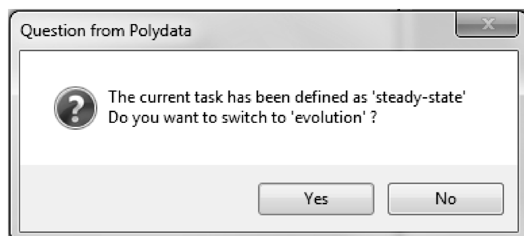
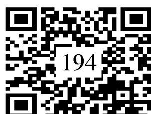


图 8-11　关于转换任务类型的系统提示



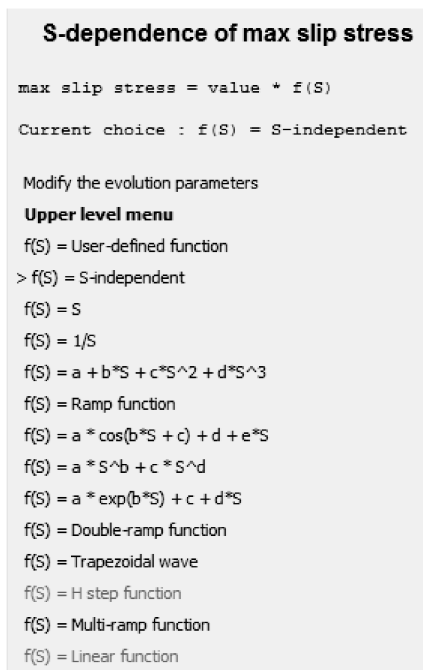


图 8-12　最大滑移应力演变方程列表页面（默认状态）

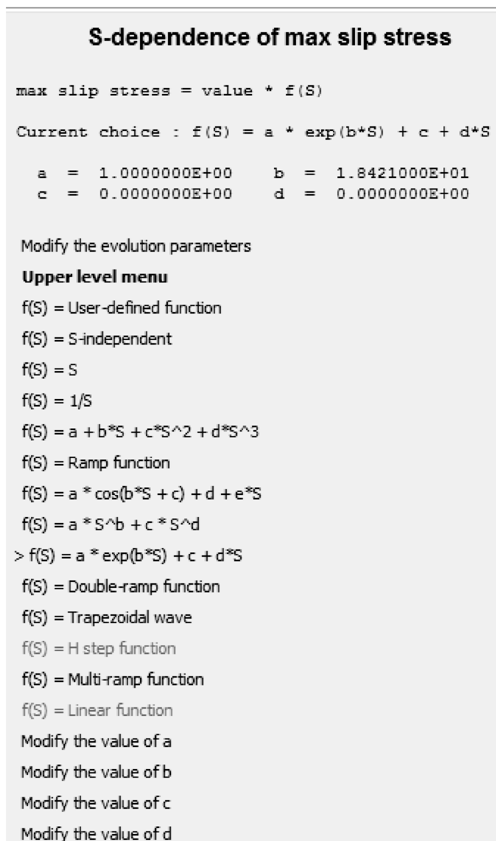


图 8-13　最大滑移应力演变方程列表页面（设定后的状态）

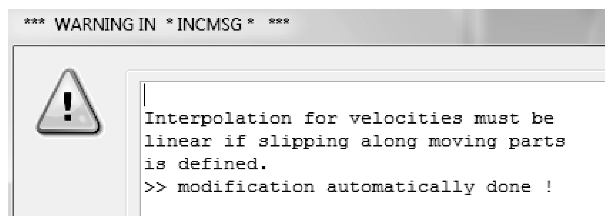
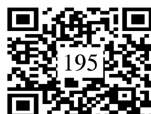


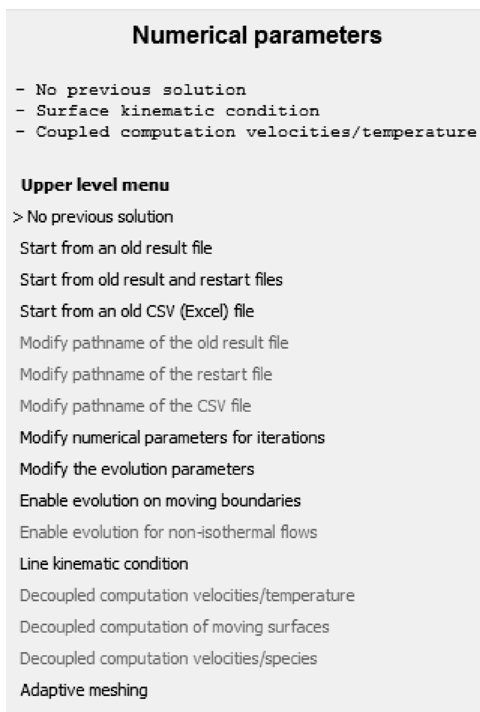
图 8-14　关于速度插值类型强制转换的系统提示

4. 演变参数的设定

由于本节中使用演变算法计算最大滑移应力的影响规律，因此需要在如图 8-15 所示的数值参数设定页面中对演变参数进行设定。单击其中的 Modify the evolution parameters（编辑演变参数）选项，进入如图 8-16 的演变参数设定页面，其中包括演变参数的初始值、上限值、初始步长、最小步长、最大步长以及最大计算步数等选项。保持其他参数为默认值，将初始步长和最大步长修改为 0.1，并且将最大计算步数增加到 50㊀。

㊀ 将最大计算步数修改为 50 并不代表系统将进行 50 次计算，而是说明当运行系统时最多进行 50 次有效的迭代计算。当有效迭代计算次数超过 50 次时，系统将停止计算。





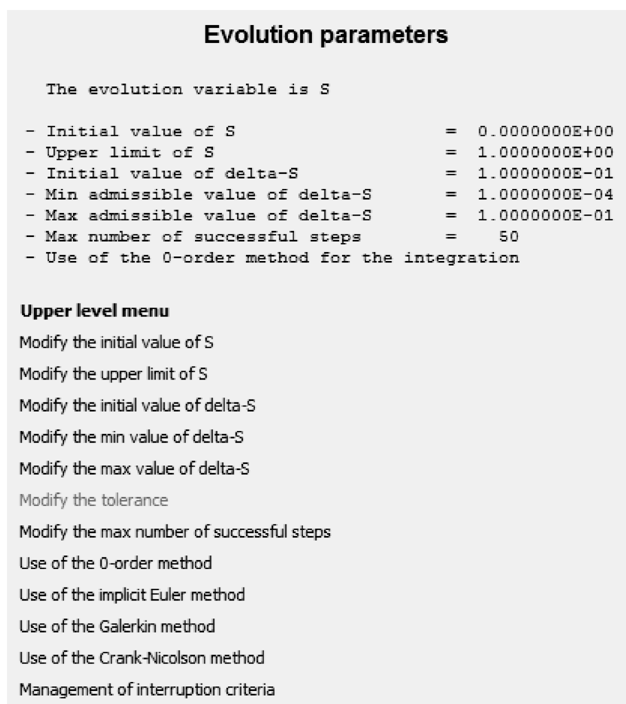
Numerical parameters

- No previous solution
- Surface kinematic condition
- Coupled computation velocities/temperature

Upper level menu

> No previous solution
Start from an old result file
Start from old result and restart files
Start from an old CSV (Excel) file
Modify pathname of the old result file
Modify pathname of the restart file
Modify pathname of the CSV file
Modify numerical parameters for iterations
Modify the evolution parameters
Enable evolution on moving boundaries
Enable evolution for non-isothermal flows
Line kinematic condition
Decoupled computation velocities/temperature
Decoupled computation of moving surfaces
Decoupled computation velocities/species
Adaptive meshing

图 8-15　数值参数设定页面



Evolution parameters

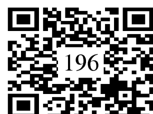
The evolution variable is S

```
- Initial value of S                    =  0.0000000E+00
- Upper limit of S                      =  1.0000000E+00
- Initial value of delta-S              =  1.0000000E-01
- Min admissible value of delta-S       =  1.0000000E-04
- Max admissible value of delta-S       =  1.0000000E-01
- Max number of successful steps        =    50
- Use of the 0-order method for the integration
```

Upper level menu

Modify the initial value of S
Modify the upper limit of S
Modify the initial value of delta-S
Modify the min value of delta-S
Modify the max value of delta-S
Modify the tolerance
Modify the max number of successful steps
Use of the 0-order method
Use of the implicit Euler method
Use of the Galerkin method
Use of the Crank-Nicolson method
Management of interruption criteria

图 8-16　演变参数设定页面（设定后状态）



5. 结果输出设定

对于演变问题，我们希望演变参数从 0 开始，每增加 0.1 就输出一个计算结果。在如图 8-17 所示的结果输出设定页面中，单击 Output Triggering 选项，进入如图 8-18 所示的输出控制设定页面，选择 Output at exact ds（在精确的 ds 上进行输出）选项，并通过! Enter the ds interval（输入 ds）选项将 ds 数值设定为 0.1。

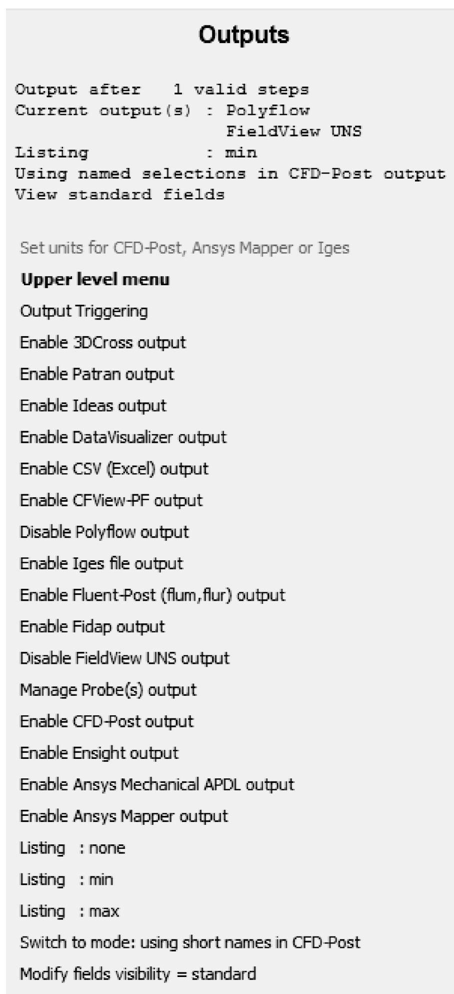


图 8-17　结果输出设定页面

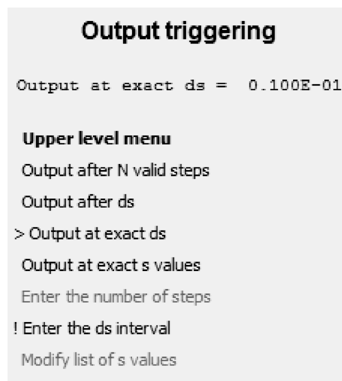
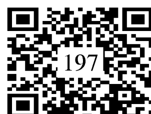


图 8-18　输出控制设定页面（设定后的状态）

完成设定后逐步保存并退出 Polydata。返回 Polyman 窗口后，单击系统运行按钮，开始计算。

8.1.3　结果分析

本例采用演变算法，螺杆壁面最大滑移应力数值逐渐增大。当最大滑移应力数值较小时，螺杆表面流体的剪切应力稍大些，物料就会在螺杆表面打滑，这样螺杆所承受的转动扭矩就会较小。与此同时，在挤出机输送过程中，机筒与物料之间的摩擦力是输送的动力，而



螺杆与物料之间的摩擦力不利于物料输送，所以在物料与螺杆表面产生打滑现象时（本例中物料与机筒为无滑移条件），产量较高。最大滑移应力对扭矩的影响如图 8-19 所示，最大滑移应力对体积流率的影响如图 8-20 所示。随着螺杆壁面最大滑移应力数值的逐渐增加，螺杆表面流体的剪切应力低于最大滑移应力的数值，螺杆与物料之间不会发生打滑现象，所以在曲线的后半部分，扭矩和产量均保持不变。

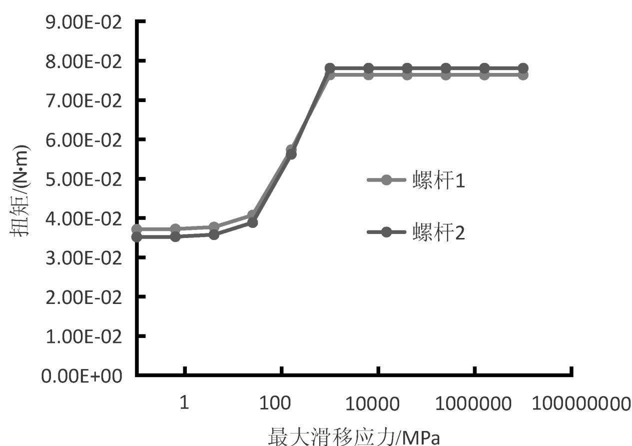


图 8-19　最大滑移应力对扭矩的影响

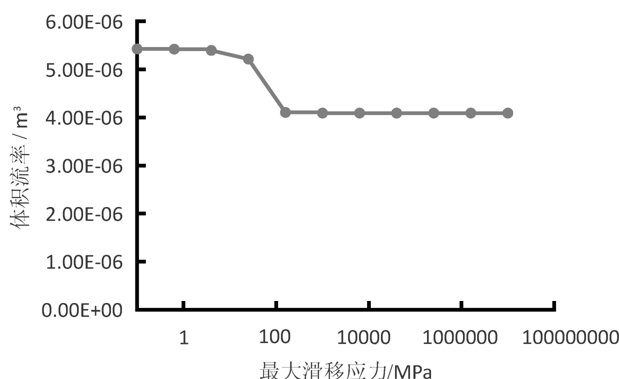


图 8-20　最大滑移应力对体积流率的影响

8.2　周期性边界条件的使用

如图 8-21 所示，该挤出螺杆段由三组相同的螺杆元件组成（螺杆元件的几何参数见第 2 章中的表 2-1）。一般情况下，可以对该模型直接进行有限元求解。但是往往由于受到计算资源的限制，相比由一组螺杆元件组成的计算模型，该计算模型的网格密度会有所降低，从而在一定程度上影响计算结果的精度。从整个模型的几何上看，由于组成该螺杆段的三个元件均一致，且从单个螺杆元件来看，一个螺杆元件的入口端截面形状和相邻的螺杆元件的出



口端截面形状是一致的。这样，可以采用周期性边界条件对流场进行设定，只需采用由一组螺杆元件组成的网格模型，便可实现对由三组螺杆元件组成的螺杆段的分析。

当所研究问题的几何模型以及其内的流动形式具有周期性重复特性时，可以采用周期性边界条件来简化计算模型。周期性边界条件要施加到一对边界上，由周期性入口和周期性出口组成。对于入口和出口来说，速度分布是相同的，但是允许其中存在一定的法向应力差或压力差。

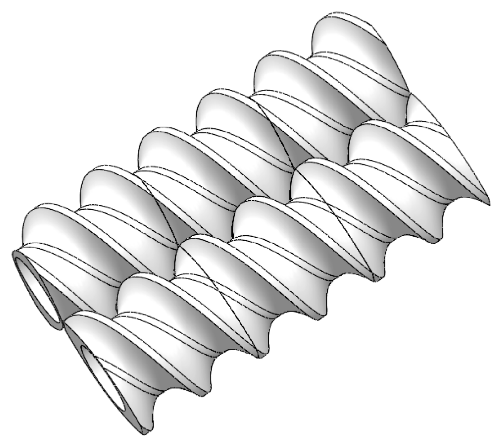


图 8-21　螺杆原件组合三个相同的输送元件

8.2.1　流场任务的设定

在 Polyman 窗口中单击 S 按钮，建立一个名为 Periodical_BC 的仿真任务，并将瞬态流场任务 TSE_01_time_depd_isothermal 中的 msh 和 dat 文件复制到新任务的对应位置。双击 msh 文件，打开如图 8-22 所示的 Polydata 设定页面。单击 F. E. M Task 1 选项，进入如图 8-23 所示的 F. E. M Task 1 设定页面。对 TSE_isothermal 子任务进行修改，进入如图 8-24 所示的 TSE_isothermal 子任务设定页面。单击其中的 Flow boundary conditions 选项，进入如图 8-25 所示的边界条件设定页面。选择入口边界，单击 Modify 按钮，进入如图 8-26 所示的边界类型选择页面。将入口条件修改为周期性条件入口边界，单击 Inlet of periodic condition 选项。进入如图 8-27 所示的周期性条件入口边界设定页面，在该页面中选择当前周期性入口边界对应的出口边界，选择出口边界 ement_side. 2 后，单击 Select（选择）按钮。

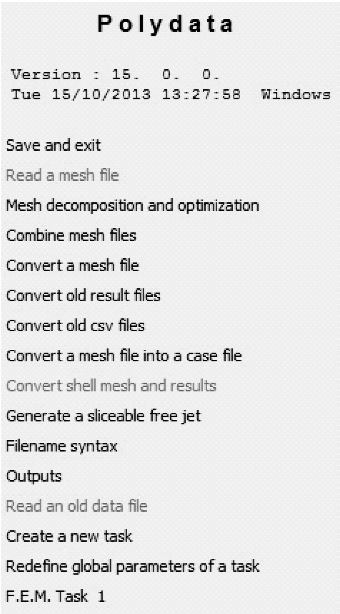


图 8-22　Polydata 设定页面

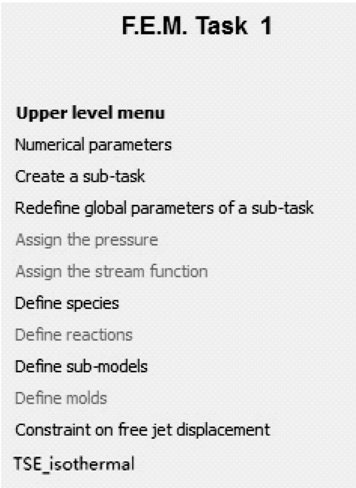
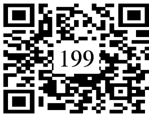


图 8-23　F. E. M Task 1 设定页面



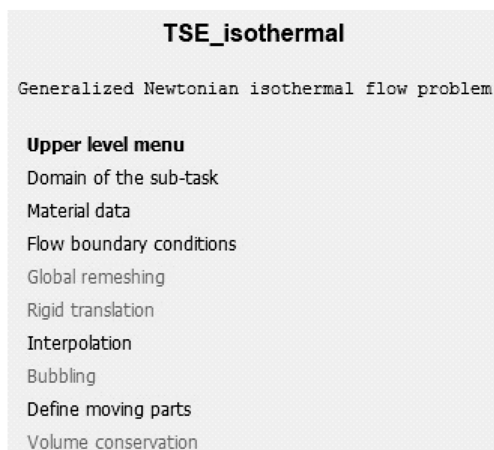


图 8-24　TSE_　isothermal 子任务设定页面

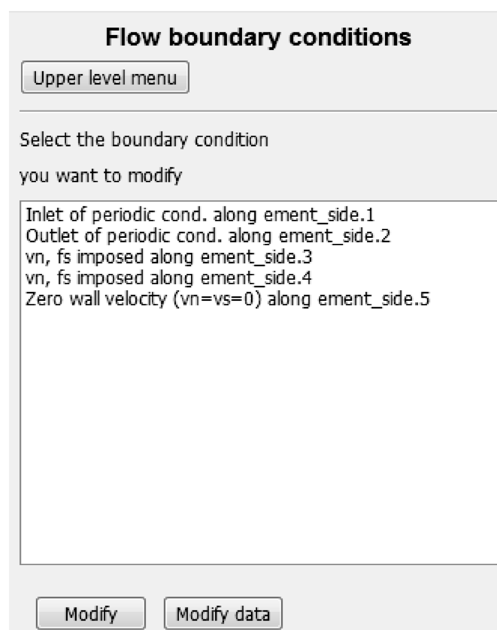


图 8-25　边界条件设定页面

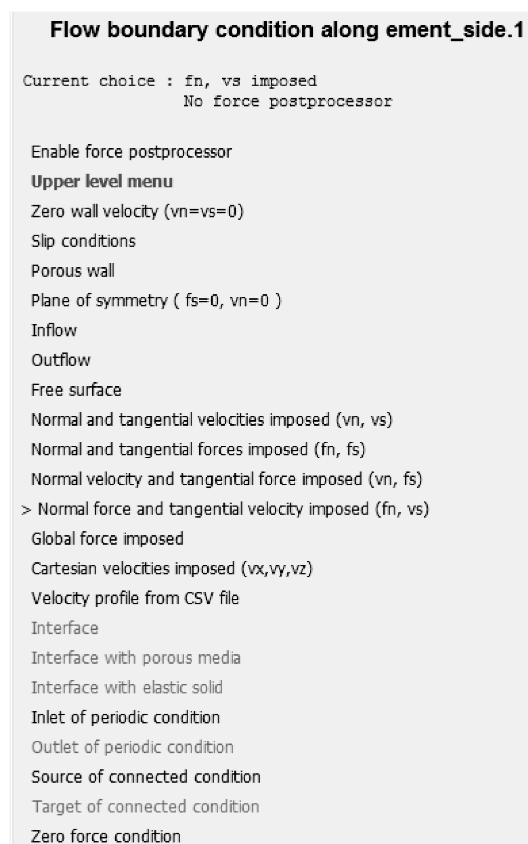


图 8-26　边界类型选择页面

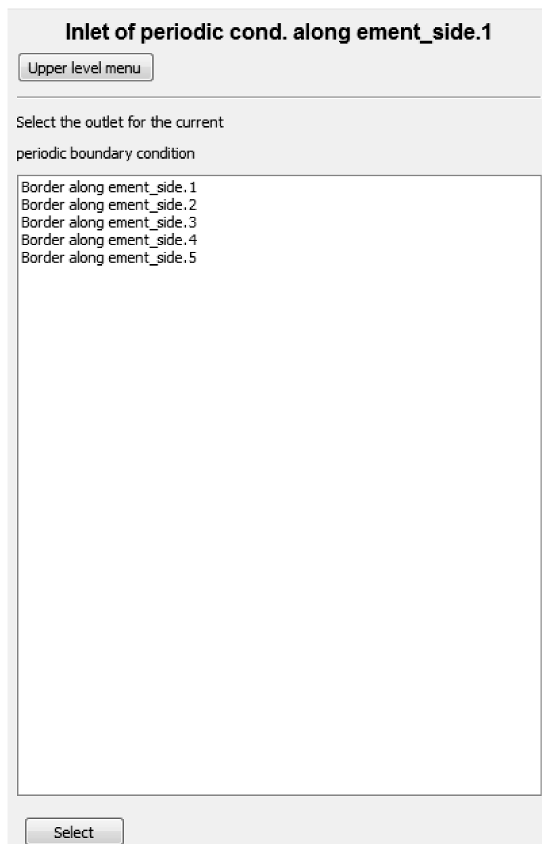
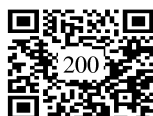


图 8-27　周期性条件入口边界设定页面



随后进入转换参数设定页面（见图 8-28），这里要设定旋转矩阵 A 和平移向量 B。要根据几何模型的出口和入口几何关系来设定这两个参数。基于 A、B 两参数，可将入口边界经过旋转和平移处理，移动到出口边界位置，并保证出口和入口边界重合。对应本例来说，出口和入口仅在 Z 方向上相距 0.025m，所以保持旋转矩阵 A 不变，将平移向量 B 修改为（0,0,0.025）。图 8-28 中还提供了根据出口和入口对应点坐标来计算旋转矩阵 A 和平移向量 B 的选项。单击 Definition by source-target points（由源-目标点进行定义）选项，进入如图 8-29 所示的源－目标点设定页面，分别输入入口面上的三个源点（Source point）及其对应的出口面上的目标点（Target point），随后可单击 Compute transformation parameters（计算转换数据）选项，以计算旋转矩阵 A 和平移向量 B。转换参数设定页面中还包括 Test of the transformation（转换测试）选项。单击该选项后，进入如图 8-30 所示的转换测试页面，可以测试入口点和出口的对应关系，以及经过 A 和 B 变换后的平面法向量对应关系。

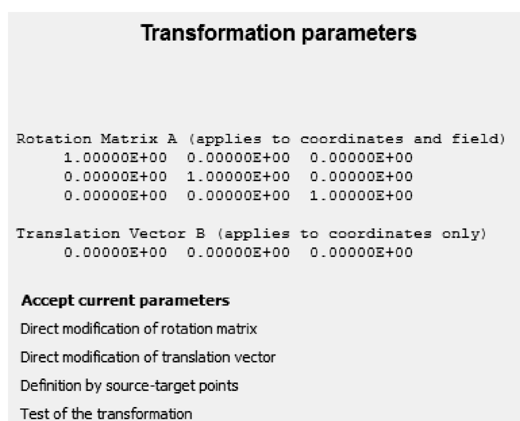


图 8-28　转换参数设定页面

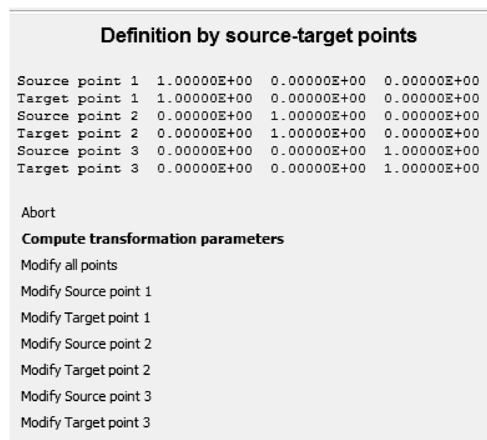


图 8-29　源-目标点设定页面

测试转换参数后，进入如图 8-31 所示的周期性边界连接关系设定页面，可以设定流率或给定法向力。在本例中，两相邻螺杆元件之间的流率是不可测的，且两者之间没有法向应力差，所以选择 Normal force imposed（施加法向力）选项，并将法向应力 fn 设定为 0。

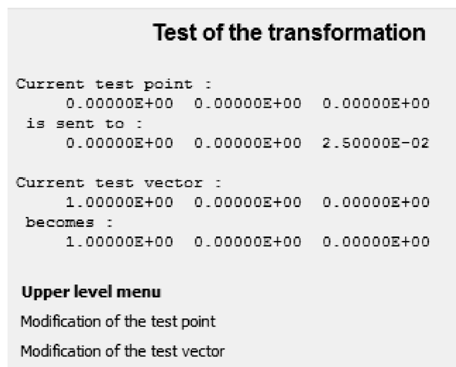


图 8-30　转换测试页面

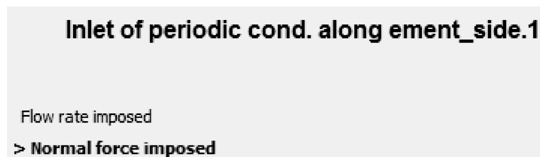
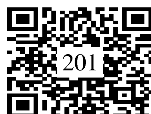


图 8-31　周期性边界连接关系设定页面



8.2.2 混合任务的设定

当流场任务使用周期性边界条件后，对应的混合任务也需要对出口和入口进行周期性边界条件设定。为此，在第4章混合任务的基础上，完成带有周期性边界的混合任务的修改。在Polyman窗口中单击S按钮，建立一个名为Periodical_BC_mixing的仿真任务，并将瞬态混合任务TSE_mixing的msh和dat文件复制到新任务的对应位置。双击msh文件，打开如图8-32所示的Polydata设定页面。

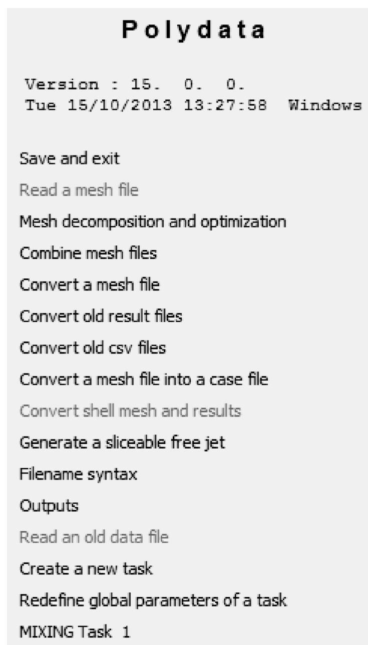


图8-32　Polydata设定页面

1. 边界条件修改

单击图8-32中的MIXING Task 1选项，进入如图8-33所示的混合任务1设定页面，对现有混合任务进行修改。这里先修改边界条件部分。单击图8-33中的Definition of the boundary conditions（定义边界条件）选项，进入如图8-34所示的边界条件设定页面。选中原为inflow类型的边界ement_side.1，单击Modify按钮，在打开的如图8-35所示的边界条件类型选择页面中，选择Entry boundary（in a spatially periodic flow）（周期性流动入口边界）选项。随后打开如图8-36所示的周期性边界使用次数设定对话框，在对话框的New value栏中输入3，表示流体流动要周期性流过3次计算模型区域。这与本章开始介绍的几何模型相匹配。单击OK按钮，关闭周期性边界使用次数设定对话框，然后进入如图8-37所示的相应边界条件设定页面，选定与入口边界配对的出口边界。选择边界列表内名为ement_side.2的出口边界后，单击Select按钮。在打开的如图8-38所示的边界条件参数设定页面中，输入旋转数组A和移动向量B，与8.2.1节中含义一致。点击！Parameters to connect spatially periodic boundaries选项，并针对A和B的逐个元素进行设定后，返回如图8-33所示的混合任务1设定页面。



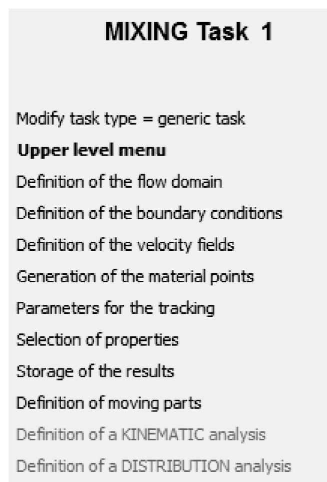


图 8-33　混合任务 1 设定页面

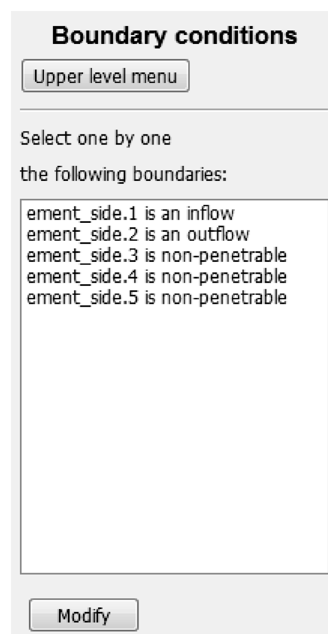


图 8-34　边界条件设定页面

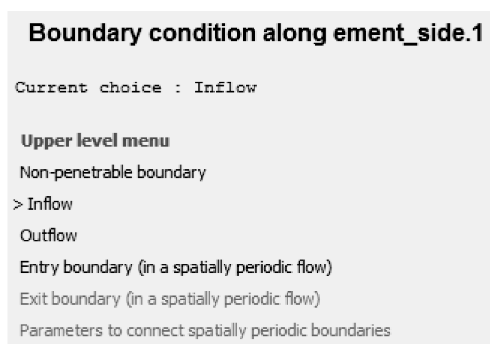


图 8-35　边界条件类型选择页面

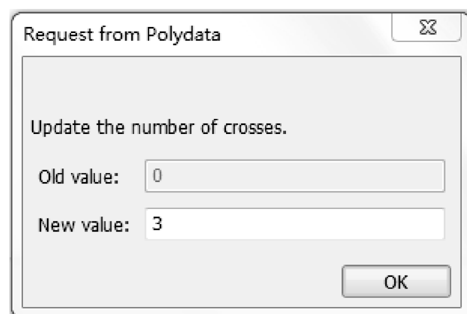
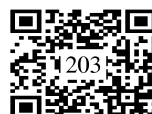


图 8-36　周期性边界使用次数设定对话框（设定后的状态）



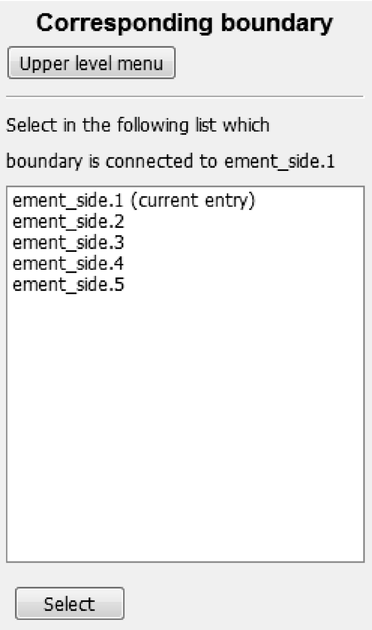


图 8-37　相应边界条件设定页面

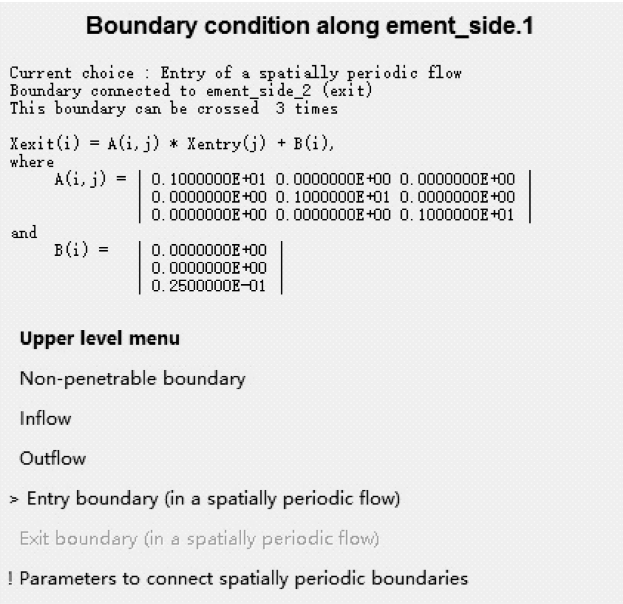


图 8-38　边界条件参数设定页面（设定后状态）

2. 流场定义修改

在混合任务 1 设定页面（见图 8-33）中单击 Definition of the velocity fields（速度场设定）选项。在打开的如图 8-39 所示的流场定义页面中，单击 Modify the prefix of the result files（编辑结果文件前缀名）选项后，在周期性边界计算任务中找到流场结果存放目录中的 Polyflow 类型的结果文件。其编号范围为1～30，且将第 30 个文件作为初始结果。每个结果之间的时间间隔为 0.0166667s（1/60s）。完成上述设定后，逐步保存并退出 Polydata，修改完毕。

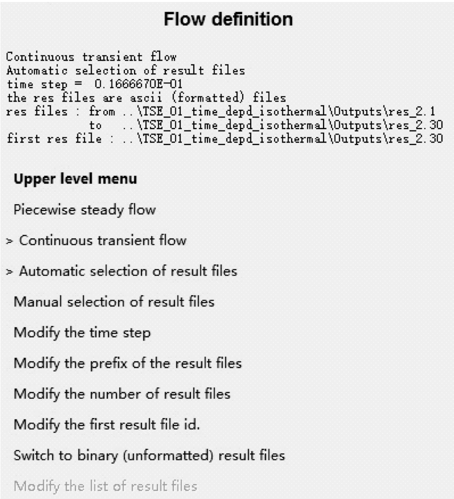


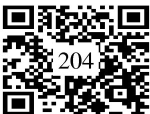
图 8-39　流场定义页面（设定后的状态）

8.2.3　计算结果的对比

为了对比结果的正确性，本节中也使用了由三个螺纹元件组成的模型进行了计算。计算中，模型入口和出口均给定了 fn＝fs＝0 的边界条件。下文中称该模型为常规边界条件模型。

1. 剪切速率场和速度场分布

本节将对比不同类型入口和出口边界条件下双螺杆挤出模型内的流场特性。图 8-40、图 8-41 和图 8-42 分别对比了周期性边界条件模型和常规边界条件模型的机筒内壁面上的剪切速率分布、入口边界上的剪切速率分布和入口边界上的法向速度大小分布。从图中可见，两种边界条件下，机筒内壁面上的剪切速率分布和入口边界上的剪切速率分布的趋势基本一



致，但是从最大剪切速率数值上来看，使用周期性边界条件计算得到的结果数据偏大。两种方法获得的入口边界上的速度场分布基本一致。

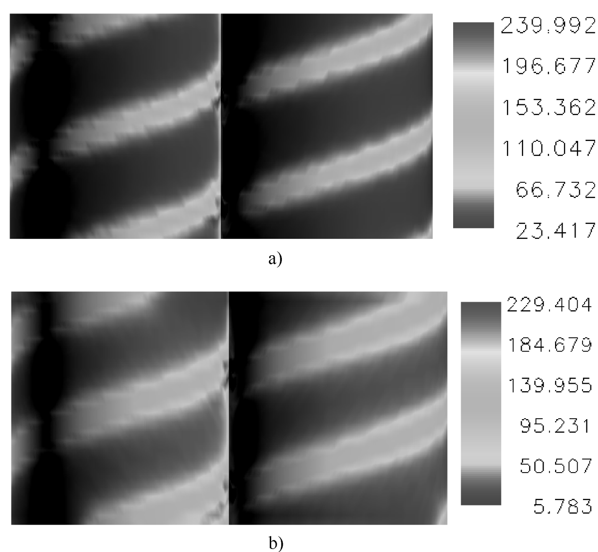


图 8-40　剪切速率场对比（机筒内壁面）
a）周期性边界条件　b）常规边界条件

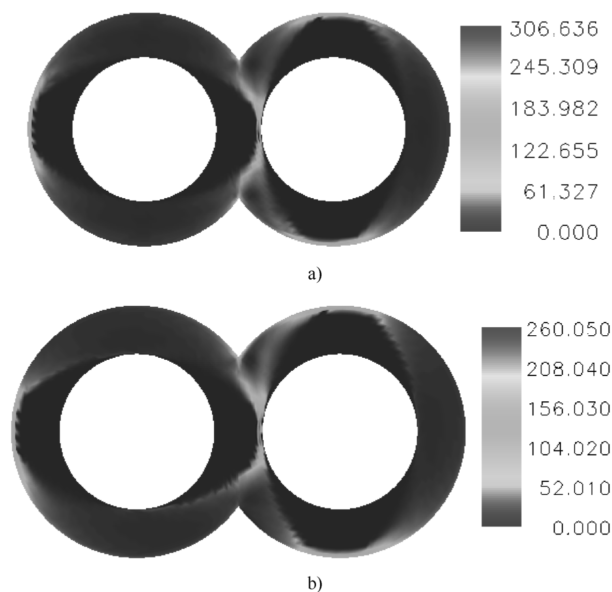


图 8-41　剪切速率场对比（入口边界）
a）周期性边界条件　b）常规边界条件



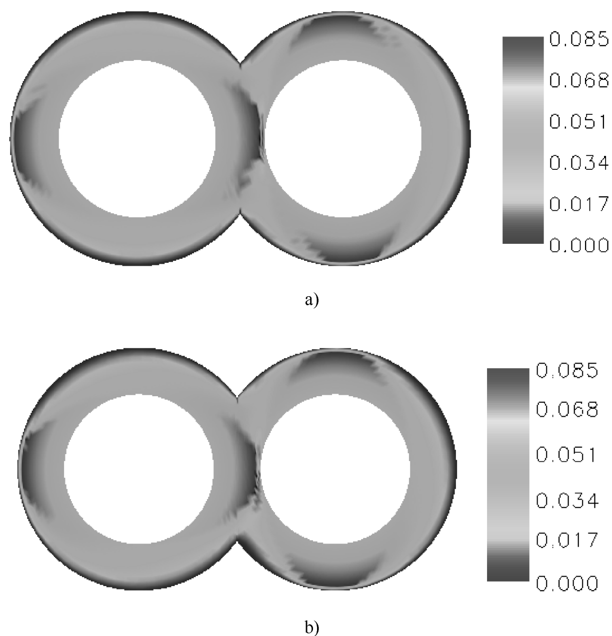


图 8-42　速度场对比（入口边界）

a）周期性边界条件　b）常规边界条件

2. 混合特性对比

由于使用了周期性边界条件，因此在进行统计分析设定轴向位置切片时需要区分 relative_coordinates（相对坐标）和 absolute_coordinates（绝对坐标）。图 8-43 给出了在 Polystat 模块中设定出口边界条件时的参数设定。除此之外，获得停留时间分布和出口切片处最大剪切速率分布的过程与第 4 章中的相关内容一致。

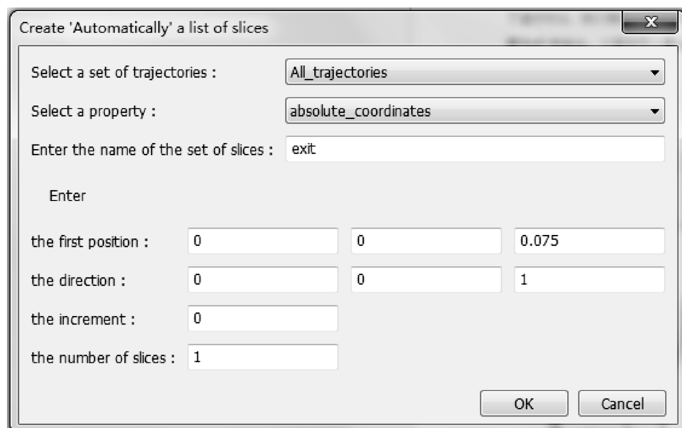
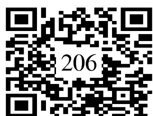


图 8-43　采用周期性边界条件时，出口切片的设定页面

图 8-44 所示对比了周期性边界条件模型和常规边界条件模型的停留时间分布曲线。从图中可以看出，两种方法得到的停留时间曲线基本重合。



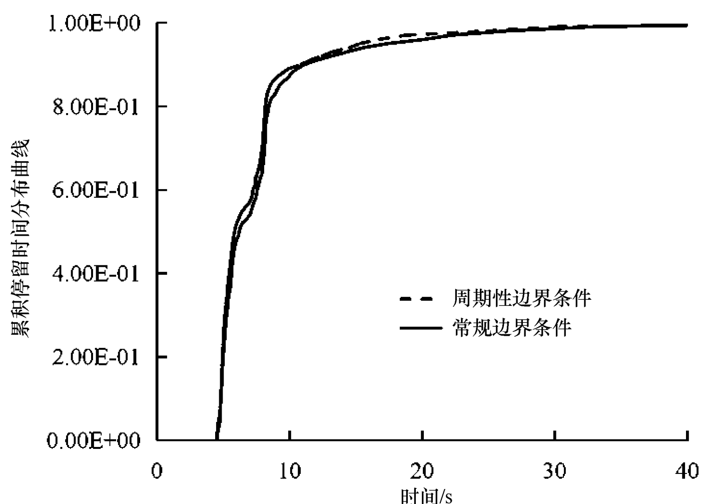


图 8-44　停留时间分布对比

图 8-45 所示对比了周期性边界条件模型和常规边界条件模型的最大剪切应力分布曲线。从图中可以看出，两种方法得到的最大剪切应力分布曲线基本重合。

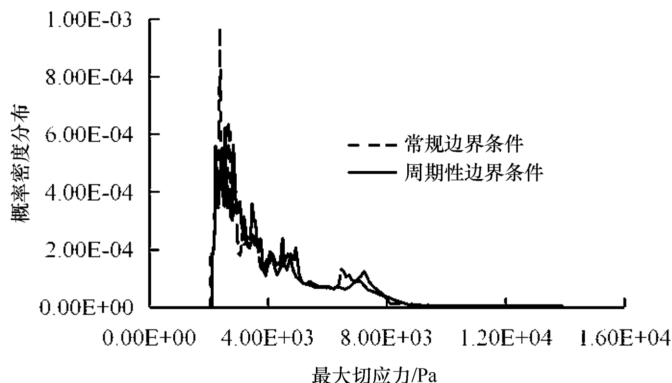
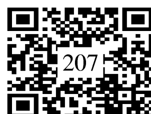


图 8-45　最大剪切应力分布对比

3. 周期性边界条件下分离尺度统计指标的设定

由于使用了周期性边界条件，因此在进行分离尺度指标统计时，其设定过程也要区分相对坐标和绝对坐标。在设定 Concentration（浓度）属性时（见图 8-46），单击 List of zones 栏对应的 Add（添加）按钮后，打开区域设定页面（见图 8-47）。在属性选择栏中选择 absolute_coordinates（绝对坐标）选项。输入正立方体体对角线两点坐标（0，-1，-0.000001）和（1,1,0.000001），该正立方体即为定义的区域。在图 8-46 中单击 a slice（切片）按钮后，在打开的如图 8-48 所示的切片设定页面中，在属性选择栏中选择 absolute_coordinates（绝对坐标）选项。该切片的位置由点（0,0,0）和向量（0,0,1）确定。



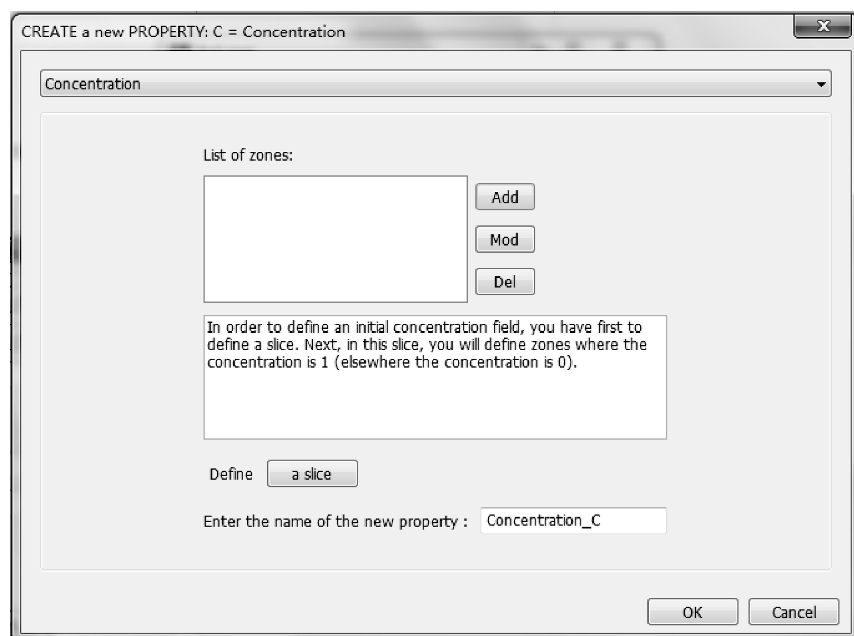


图 8-46 浓度属性设定页面

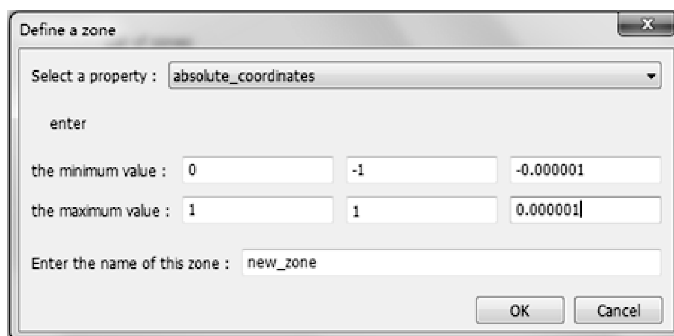


图 8-47 区域设定页面（设定后的状态）

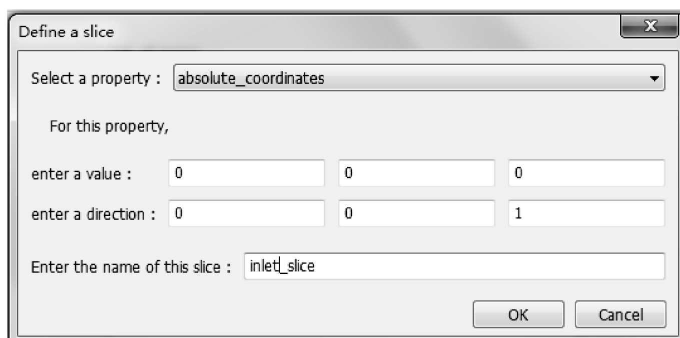


图 8-48 切片设定页面（设定后的状态）



此外，在设定轴向位置切片时（见图 8-49），在属性选择栏中应选择 absolute_coordinates（绝对坐标）选项⊖。该轴向切片由初始位置（0，0，0）、方向向量（0，0，1）、增量 0.015 和切片数量 6 确定。

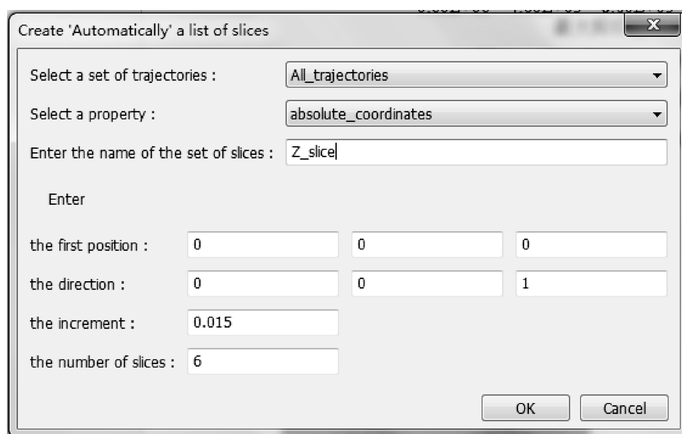


图 8-49　轴向位置切片设定页面（设定后的状态）

最后，在进行统计结果观察时，在如图 8-50 所示的属性页面中，坐标栏要选择 absolute_coordinates（绝对坐标）选项。

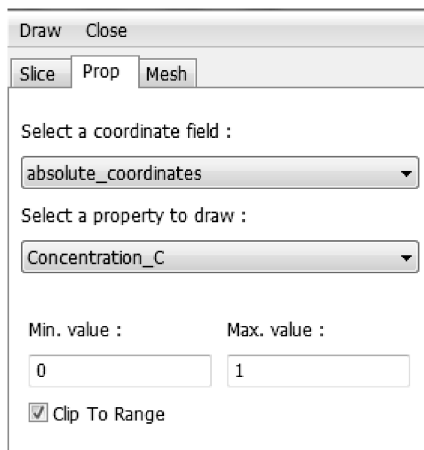


图 8-50　属性页面

图 8-51 对比了周期性边界条件模型和常规边界模型中不同轴向界面上示踪粒子的分布状态。图左侧为周期性边界条件对应结果，右侧为常规边界条件对应结果。由于在两种情况

⊖ 本节进行分离尺度统计时设定了轴向位置切片，而在 4.2.5 节中分离尺寸的分析是在时间切片下进行的。这两种切片方式可以按照两种不同的思路去理解。使用时间切片，两种示踪粒子在 t = 0 时，以脉冲方式一次性注入流场内，然后观察两种示踪粒子在整个流体区域内的分布均匀性变化。而使用位置切片，两种示踪粒子在 t = 0 时开始持续不断地以单位时间相同的量注入流场中，在每个位置的切片上观察两种示踪粒子经过该位置切片时的分布状态。



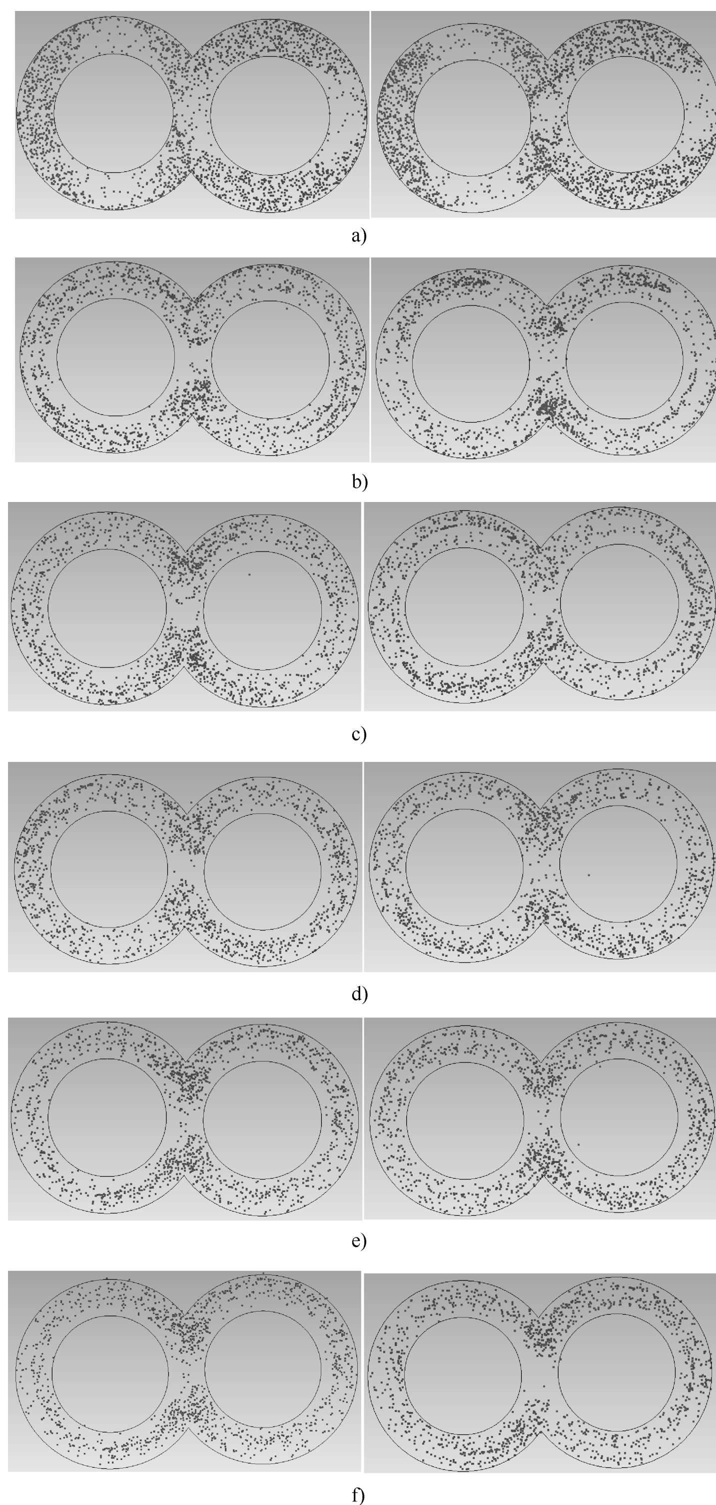


图 8-51　示踪粒子的分布状态

a）Z = 0mm　b）Z = 0. 015mm　c）Z = 0. 03mm　d）Z = 0. 045mm　e）Z = 0. 060mm　f）Z = 0. 075mm



下，入口随机布置的示踪粒子分布存在一定差别，因此 Z = 0.015mm 对应切片上的两种颜色的示踪粒子分布状态存在一定差异。随着不断混合，两种方法获得的分布状态之间的差异越来越小。

从以上对比中可以看出，使用周期性边界条件模型计算的结果与采用常规边界条件模型计算的结果基本相同，都能够正确描述流场状态。但值得注意的是，常规边界条件流场计算使用的螺杆元件模型包含三组相同的螺杆元件，其流场部分的网格数为 253350、节点数为 273372，而周期性边界条件计算采用的模型与第 3 章使用的模型一致（仅仅包含一组螺杆元件），其网格数为 96000、节点数为 105534。使用周期性边界条件进行流场计算不仅可以有效地提高计算效率，而且对计算资源的要求也大大降低。



如何激活本书的书伴权限

下载“书伴”



用手机浏览器打开www.weixue.co，按照提示下载对应版本的“书伴”APP。

或者用“微信”扫描左侧二维码，并点击右上角“三个点”按钮，在呼出的菜单中选择“在浏览器中打开”，并按照提示下载对应版本的“书伴”APP。

注册账号

首次打开“书伴”，选择“注册账号”，按照提示注册账号。

激活本书权限

注册账号后，刮开左侧的刮刮卡，尽可能刮干净，露出全部二维码。用已注册的账号登录书伴，点击书伴开始界面下方正中间的“扫一扫”，扫描刮开的二维码即可激活本书。

特别注意，激活时仅能绑定一个手机号码及对应的“书伴”账号。

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88379833
读者购书热线：010-88379649
网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
教育服务网：www.cmpedu.com
金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版



机工教育微信服务号

上架指导 软件

ISBN 978-7-111-59660-8

策划编辑◎**姜凤** / 封面设计◎**马精明**



236225



定价：49.00元